



DIPLOMARBEIT

Ing.
Markus Kindl

**Substitution konventioneller
Beleuchtungstechnik
mittels LED-Beleuchtung
hinsichtlich technischer und
ökonomischer Kriterien**

Substitution of conventional road lighting systems
with LED technology in reference to technical and
economic characteristics

Innsbruck, 2015

DIPLOMARBEIT

Substitution konventioneller Beleuchtungstechnik mittels LED-Beleuchtung hinsichtlich technischer und ökonomischer Kriterien

Autor:

Ing. Markus Kindl

Studiengang:

Wirtschaftsingenieurwesen

Seminargruppe:

KW11wIA-F

Erstprüfer:

Prof. Dr. Dr. h.c. Hartmut Lindner

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Koch

Einreichung:

Mittweida, November 2015

Verteidigung/Bewertung:

Wiener Neustadt, Dezember 2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
Formelverzeichnis.....	viii
Abkürzungsverzeichnis	viii
Bibliografische Beschreibung	ix
Referat.....	ix
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Zielsetzung	1
1.2. Kapitelübersicht	1
1.3. Ausgangslage.....	2
2. Grundlagen	3
2.1. Technik.....	3
2.1.1. Leuchten	3
2.1.2. Lichttechnik	4
2.1.2.1. Lichtstrom	4
2.1.2.2. Lichtstärke	5
2.1.2.3. Beleuchtungsstärke	5
2.1.2.4. Leuchtdichte	6
2.1.2.5. Lichtverteilung.....	7

2.1.2.6. Reflexionskoeffizient	8
2.1.2.7. Lichtfarbe und Farbwiedergabe	9
2.1.2.8. ULR - upward light ratio	10
2.1.3. Leuchtentypen.....	10
2.1.4. Lampentypen	11
2.1.4.1. Glühlampen	12
2.1.4.2. Niederdruckentladungslampen	12
2.1.4.3. Hochdruckentladungslampen	13
2.1.4.4. LED.....	14
2.1.5. Berechnungsklassen nach EN 13201	15
2.2. Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse	20
2.2.1. Rentabilitätsrechnung.....	20
2.2.2. Amortisationsrechnung.....	22
2.2.3. Nutzwertanalyse.....	23
3. Technische Betrachtung der Umrüstung	26
3.1. Allgemeines zur Umrüstung.....	26
3.2. Abgrenzung und Problem der Umrüstung	26
3.3. Konventionelles Vergleichssystem	28
3.3.1. Leuchte	28
3.3.2. Leuchtmittel.....	29
3.4. LED Vergleichssystem	32
3.5. Gegenüberstellung in der Beleuchtungssimulation.....	36
3.5.1. Software zur Simulation	36

4. Wirtschaftlicher Vergleich von konventionellen Anlagen mit LED Anlagen.....	37
4.1. Kostenvergleich	37
4.1.1. Vergleich einer S-Klassen Situation	38
4.1.1.1. Variante Bestandsbeleuchtung	39
4.1.1.2. Variante Umrüstung auf selben Masten mit gleichem Lichtstrom ..	41
4.1.1.3. Normgerechte Planung	43
4.1.1.4. Gegenüberstellung Anschaffungskosten und laufende Kosten.....	45
4.1.2. Vergleich einer ME-Klassen Situation	48
4.1.2.1. Variante Bestandsbeleuchtung	50
4.1.2.2. Variante Umrüstung auf selben Masten mit gleichem Lichtstrom ..	51
4.1.2.3. Normgerechte Planung	53
4.1.2.4. Gegenüberstellung Anschaffungskosten, laufende Kosten.....	54
4.2. Nutzwertanalyse	58
4.2.1. Datengrundlage.....	58
4.2.2. Umfrage	59
4.2.3. Kriterien.....	64
4.2.4. Auswertung	72
5. Zusammenfassung	75
Anhang.....	I
Literaturverzeichnis	I

Anlagen	V
Danksagung	XXXVIII
Selbstständigkeitserklärung.....	XXXVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip lichttechnische Grundgrößen (Quelle: eigene Darstellung)	4
Abbildung 2: Leuchtdichte	6
Abbildung 3: Lichtverteilung	7
Abbildung 4: Reflexionskoeffizient	9
Abbildung 5: Leuchtentypen.....	11
Abbildung 6: Prinzip LED	15
Abbildung 7: Ausstrahlwinkel einer Leuchte (Prinzipskizze)	27
Abbildung 8: Technische Daten konventionelles System.....	29
Abbildung 9: technische Daten CosmoPolis 140W	30
Abbildung 10: technische Daten CosmoPolis 60W	31
Abbildung 11: DIALUX	36
Abbildung 12: Foto Bestandsbeleuchtung S-Klasse (eigene Fotografie)	38
Abbildung 13: Simulation Bestandsbeleuchtung S-Klasse.....	40
Abbildung 14: Simulation 1:1 Austausch S-Klasse.....	42
Abbildung 15: normgerechte Planung S-Klasse.....	44
Abbildung 16: Kosten laufender Betrieb.....	46
Abbildung 17: Kosten laufender Betrieb mit Investition Beispiel S-Klasse	47
Abbildung 18: Anschaffung im Vergleich zur Einsparung Beispiel S-Klasse.....	48
Abbildung 19: Foto Bestandsbeleuchtung ME-Klasse (eigene Fotografie)	49
Abbildung 20: Simulation Bestandsbeleuchtung ME-Klasse.....	50
Abbildung 21: Simulation 1:1 Tausch ME-Klasse.....	52
Abbildung 22: Simulation normgerechte Beleuchtung ME-Klasse	53
Abbildung 23: Kosten laufender Betrieb Beispiel ME Klasse	55
Abbildung 24: Kosten laufender Betrieb mit Investition Beispiel ME-Klasse	56

Abbildung 25: Anschaffung im Vergleich zur Einsparung Beispiel ME-Klasse	57
Abbildung 26: Expertenaufteilung	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ME Beleuchtungsklassen	19
Tabelle 2: S Beleuchtungsklassen	20
Tabelle 3: Beispiel Nutzwertanalyse	24
Tabelle 4: Vergleich LED Leuchten Vergleichswert 140W Cosmopolis	33
Tabelle 5: Vergleich LED Leuchten Vergleichswert 60W Cosmopolis	34
Tabelle 6: Zusammenfassung der Gegenüberstellung.....	35
Tabelle 7: laufende Kosten Bestandsleuchte S-Klasse.....	41
Tabelle 8: laufende Kosten 1:1 Austausch S-Klasse.....	43
Tabelle 9: laufende Kosten normgerechte S-Klasse	45
Tabelle 10: laufende Kosten Beispiel S-Klasse.....	45
Tabelle 11: Anschaffung Beispiel S-Klasse.....	46
Tabelle 12: Leuchtmittelwechsel Beispiel S-Klasse	47
Tabelle 13: laufende Kosten Bestandsleuchte ME-Klasse.....	51
Tabelle 14: laufende Kosten 1:1 Austausch ME-Klasse.....	53
Tabelle 15: laufende Kosten normgerechte ME-Klasse	54
Tabelle 16: laufende Kosten Beispiel ME-Klasse.....	55
Tabelle 17: Anschaffung Beispiel ME-Klasse.....	56
Tabelle 18: Leuchtmittelwechsel Beispiel ME-Klasse	57
Tabelle 19: Auswertung Expertenbefragung	73
Tabelle 20: Auswertung Expertenbefragung mit Gewichtung	74

Formelverzeichnis

Formel 1: Definition Lichtstärke.....	5
Formel 2: Definition Beleuchtungsstärke.....	5
Formel 3: Definition Leuchtdichte.....	6
Formel 4: Rentabilität.....	21
Formel 5: Amortisationszeit.....	22

Abkürzungsverzeichnis

ULR	upward light
LED	light-emitting diode
CE	Communauté Européenne
ENEC	European Norms Electrical Certification
ÖVE	Österreichische Verband für Elektrotechnik
UV	Ultraviolettstrahlung
IP	International Protection
LM	Leuchtmittel
LVK	Lichtverteilungskurve
CLO	constant light output
CRI	color rendering index
TI	threshold increment

Bibliografische Beschreibung

Kindl, Markus:

Substitution konventioneller Beleuchtungstechnik mittels LED-Beleuchtung hinsichtlich technischer und ökonomischer Kriterien – 2015 – 76 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida

Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Diplomarbeit, 2015

Referat

Die vorliegende Arbeit befasst sich neben der Beschreibung der Grundlagen der Straßenbeleuchtung, mit der Gegenüberstellung von konventionellen Leuchtmitteln und LED Beleuchtungsanlagen. Anhand einer Marktanalyse werden die technischen Daten verglichen und in Vergleichssimulationen verschiedene Situationen aus der Praxis durchgerechnet und investitionsseitig bewertet. Zum Abschluss werden mittels Nutzwertanalyse die subjektiven Empfindungen von Planern und Entscheidern zusammengefasst und für eine Gesamtbetrachtung der Umrüstungsthematik hinzugezogen.

1. Einleitung

Im Einleitungskapitel wird die Aufgabenstellung und Motivation der Diplomarbeit dargelegt, außerdem werden die einzelnen Kapitel kurz erklärt.

1.1. Motivation und Zielsetzung

Seit einigen Jahren schon beginnt die LED Leuchte die klassische Straßenleuchte aus dem Markt zu verdrängen, viele Verantwortliche sehen keine Alternative mehr zur LED Leuchte und der Umrüstung von ganzen Beleuchtungsanlagen. Doch hier stellt sich die Frage, ob diese Umrüstung und die Nichtmehrberücksichtigung bewährter konventioneller Techniken auf Versprechungen basieren, welche genauer betrachtet nicht haltbar sind und den scheinbaren wirtschaftlichen und technologischen Vorsprung größer erscheinen lässt als er tatsächlich ist. In dieser Arbeit sollen die Systeme an Hand von Beispielen aus der Praxis sowohl technisch, als auch wirtschaftlich verglichen und bewertet werden. Dazu soll erörtert werden, ob die gängigen Praktiken der Umrüstung von Lichtanlagen, wie sie gerade in vielen kleinen Gemeinden üblich sind, wirtschaftlich und technisch sinnvoll sind.

1.2. Kapitelübersicht

In Kapitel 1 wird die Ausgangslage dargestellt und die notwendige Eingrenzung für diese Arbeit vorgenommen, welche für einen strukturierten Aufbau notwendig war, da die Thematik der Straßenbeleuchtung, analysiert bis ins letzte Detail, zu umfangreich für eine einzelne Arbeit wäre.

Kapitel 2 behandelt die Grundlagen, welche für den praktischen Teil dieser Diplomarbeit notwendig sind und erklärt den wichtigen, lichttechnischen Hintergrund. Hier werden Grundgrößen, Leuchtenarten, Lampentypen und Normen erläutert und bereits erste technische Möglichkeiten für die weitere Bearbeitung ausgeschlossen. In den wirtschaftlichen Grundlagen dieses Kapitels werden die

Werkzeuge für die spätere wirtschaftliche Analyse angeführt. Das 3. Kapitel beinhaltet den rein technisch betrachteten Vergleich der verschiedenen Leuchtenvarianten und betrachtet die Beleuchtungslösungen hinsichtlich der lichttechnischen Leistungsdaten.

In Kapitel 4 kommt zur zahlenmäßigen Erfassung von subjektiven Eindrücken von Planern und Entscheidern eine Nutzwertanalyse zum Einsatz. Weiters wird eine Beispielberechnung mit verschiedenen Ansätzen aus der Praxis simuliert und hinsichtlich Ihrer Investitionssummen und Einsparungspotenziale bewertet.

Im abschließenden 5. Kapitel wird die Arbeit zusammengefasst und die Ergebnisse werden analysiert.

1.3. Ausgangslage

Die LED löst langsam alle alten Beleuchtungstechniken ab, manche zu Recht, einige werden aber, obwohl wirtschaftlich sinnvoll, ebenfalls ins Eck der "alten" Technologie gestellt. Es gibt Unternehmen, die Geld in die Weiterentwicklung von konventioneller Technik gesteckt haben und diese durchaus in eine konkurrenzfähige Richtung entwickelt haben. Durch viel Werbung, sowie Förderungen zur Umrüstung, wurde von vielen Kommunen der Weg in Richtung LED Technik eingeschlagen, ohne über Alternativen nachzudenken. Dabei gibt es verschiedene Ansätze der Substitution, zum einen den meistens fehlerhaften und nicht normgerechten Eins-zu-eins Tausch der Leuchten. Hier wird, wenn der Mast technisch in Ordnung ist, nur der Kopf getauscht und Leuchtenabstände und Lichtpunkthöhen gleich belassen. In diesem Fall lassen sich auf dem Papier sehr schöne Amortisationszeiten ausrechnen, die aber bezogen auf die rechtliche Situation und die normativen Anforderungen so nicht zulässig sind. In diesem Fall müsste man häufig neue Mastabstände definieren und gegebenenfalls auch die Masthöhe ändern, was dann zu erheblichen Mehrkosten führt und bei normgerechter Ausführung sogar zu höheren laufenden Kosten führen kann.

Die große Frage ist ob LED Technik wirklich in allen Bereichen besser als konventionelle Technik ist und ob bei einer Neuausrüstung oder Umrüstung wirklich nur an LED Technik zu denken ist.

2. Grundlagen

2.1. Technik

2.1.1. Leuchten

Eine Leuchte besteht aus einem Leuchtmittel, dem Leuchtmittelträger (Sockel, Platine, o.ä.), einem Vorschaltgerät und dem Leuchtengehäuse.

Das Leuchtengehäuse muss in geschlossener Bauweise korrosionsfrei, in Metall oder Kunststoff gefertigt sein. Es muss mit witterungsbeständigen Dichtungen ausgestattet sein, um die elektrischen Komponenten (Vorschaltgeräte, Zündgeräte, Fassungen, Platinen, usw.) zu schützen und mindestens die Schutzart IP44 erfüllen. Schutzart IP44 bedeutet dass die Leuchte gegen Eindringen von Fremdkörpern >1mm und Spritzwasser geschützt sein muss. Schlagfestigkeit, UV und Temperaturbeständigkeit zeichnen eine gute Leuchte aus.

Mechanische Sicherungen gegen Herabfallen von Leuchtenteilen beim Öffnen der Leuchte müssen vorgesehen werden, die elektrische Einheit sollte wartungsfrei ausgeführt werden und im Austauschfall einfach zu wechseln sein. Die Leuchte muss einen einfachen Leuchtmitteltausch ermöglichen und einfach zu reinigen sein.

Die notwendige Schutzklasse und eine Möglichkeit der Kompensation muss mit dem Kunden bzw. verantwortlichen elektrotechnischen Fachmann abgestimmt werden. Ebenso kann von Kundenseite eine Absenkung des Beleuchtungsniveaus gefordert werden, welche ohne Änderung der lichttechnischen Eigenschaften der Leuchte einhergehen muss.

Ein wichtiger Teil der Beleuchtung ist der Mast, welcher in Kunststoff, Stahl, Alu, Niro oder Beton ausgeführt werden kann. Im Besonderen ist auf die Übergangszone Mast-Erdreich, in welcher mit erhöhter Korrosion zu rechnen ist, zu achten und gegebenenfalls ein zusätzlicher Schutz anzubringen. Ausnahmslos sollten nur Produkte eingesetzt werden, welche den gesetzlichen Bestimmungen entsprechen und über die notwendigen Kennzeichnungen, wie z.B. CE, ENEC oder ÖVE, verfügen.¹

2.1.2. Lichttechnik

Es gibt in der Lichttechnik vier Grundgrößen und einige Parameter, welche das Empfinden und das Ergebnis einer Beleuchtung stark beeinflussen können. Die Grundgrößen und alle für die weitere Betrachtung notwendigen Größen werden nachstehend detailliert.

Prinzipdarstellung der lichttechnischen Grundgrößen

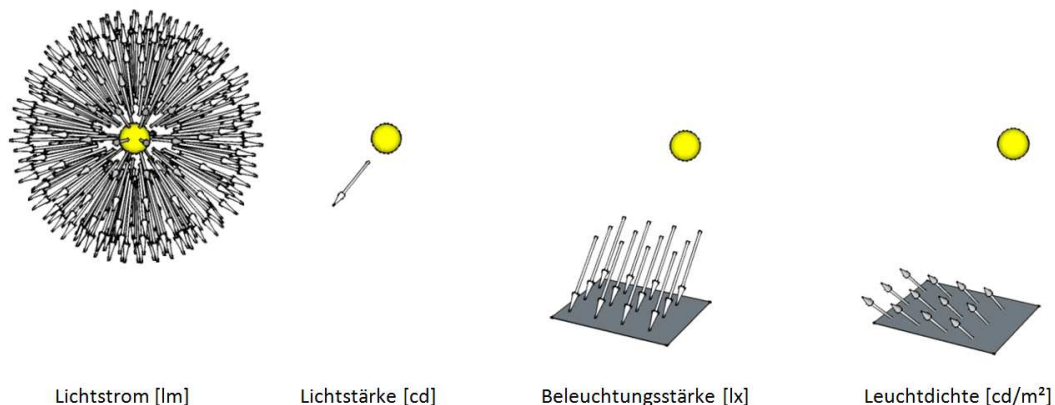


Abbildung 1: Prinzip lichttechnische Grundgrößen (Quelle: eigene Darstellung)

2.1.2.1. Lichtstrom

Der Lichtstrom $[\Phi]$, gemessen in der Einheit Lumen (lm), gibt die Lichtleistung an, welche eine Lichtquelle in alle Raumwinkel abstrahlt. Diese Einheit wird

¹ Vgl. N. Thiemann, M. Aigner (2013), S. 53 ff.

entscheidend sein in der späteren Bewertung der Leuchte, sie ist wichtig für den direkten Leistungsvergleich der Leuchte. In Kombination mit der Leuchteneffizienz und der elektrischen Leistung der Leuchte kann hier die Effizienz der Leuchte in Lumen pro Watt ermittelt und angegeben werden.

2.1.2.2. Lichtstärke

Die Lichtstärke [I], gemessen in der Einheit Candela (cd), beschreibt den Lichtstrom, der nur in eine bestimmte Richtung bzw. in einen Raumwinkel (Ω) strahlt. Eine Leuchte kann z.B. denselben Lichtstrom aufweisen, jedoch kann sich durch unterschiedliche Reflektortechnik die Lichtstärke gravierend unterscheiden.

Formel 1: Definition Lichtstärke²

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

2.1.2.3. Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke [E], gemessen in der Einheit Lux (lx), ist das Maß für den Lichtstrom, welcher von einer Lichtquelle aus auf eine definierte Fläche auftrifft. Wenn man 1m² Fläche gleichmäßig mit 1lm beleuchtet, dann erzeugt man auf dieser Fläche 1lx.

Formel 2: Definition Beleuchtungsstärke³

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

² Vgl. C. Bartenbach (2009), S.15

³ Vgl. C. Bartenbach (2009), S.23

2.1.2.4. Leuchtdichte

Die Leuchtdichte [L], gemessen in der Einheit Candela pro Quadratmeter (cd/m²), beschreibt den Eindruck den das Auge von der Helligkeit einer Fläche hat, die selbst leuchtet oder beleuchtet wird. Die Einheit sagt aus, wie hoch die Lichtstärke in einem definierten Ausschnitt dieser Fläche ist. Die Leuchtdichte ist die einzige der oben genannten Größen welche für das menschliche Auge wahrnehmbar ist.⁴

Formel 3: Definition Leuchtdichte⁵

$$L = \frac{I}{A^*}$$

$$(A^* = A * \cos\beta)$$

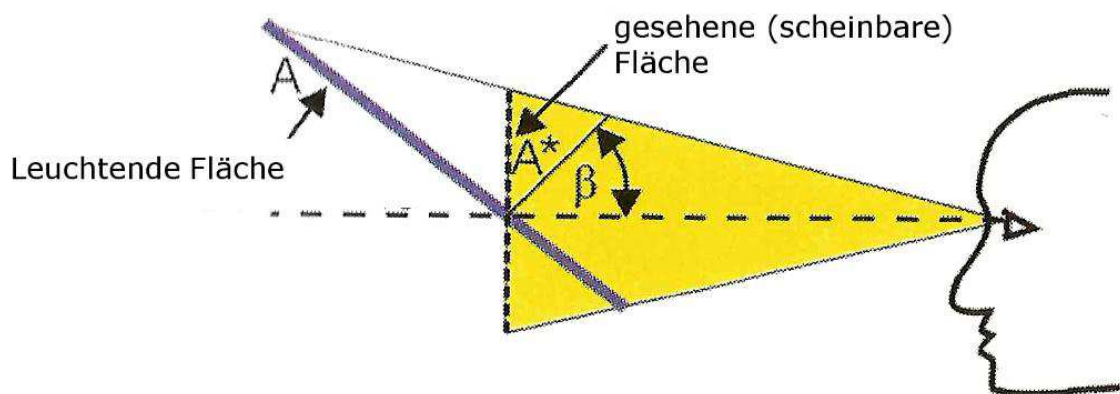


Abbildung 2: Leuchtdichte⁶

⁴ Vgl. licht.de, Straßen, Wege und Plätze (2014), S.8

⁵ Vgl. C. Bartenbach (2009), S.34

⁶ Vgl. C. Bartenbach (2009), S.34

2.1.2.5. Lichtverteilung

Soll eine Lichtverteilung grafisch dargestellt werden, so trägt man die einzelnen Lichtstärkewerte je Raumwinkel auf und erhält eine räumliche Lichtstärkeverteilung einer Lichtquelle. In der Praxis greift man auf Schnitte dieser räumlichen Darstellung zurück, diese nennt man Lichtverteilungskurven, oder abgekürzt LVK.

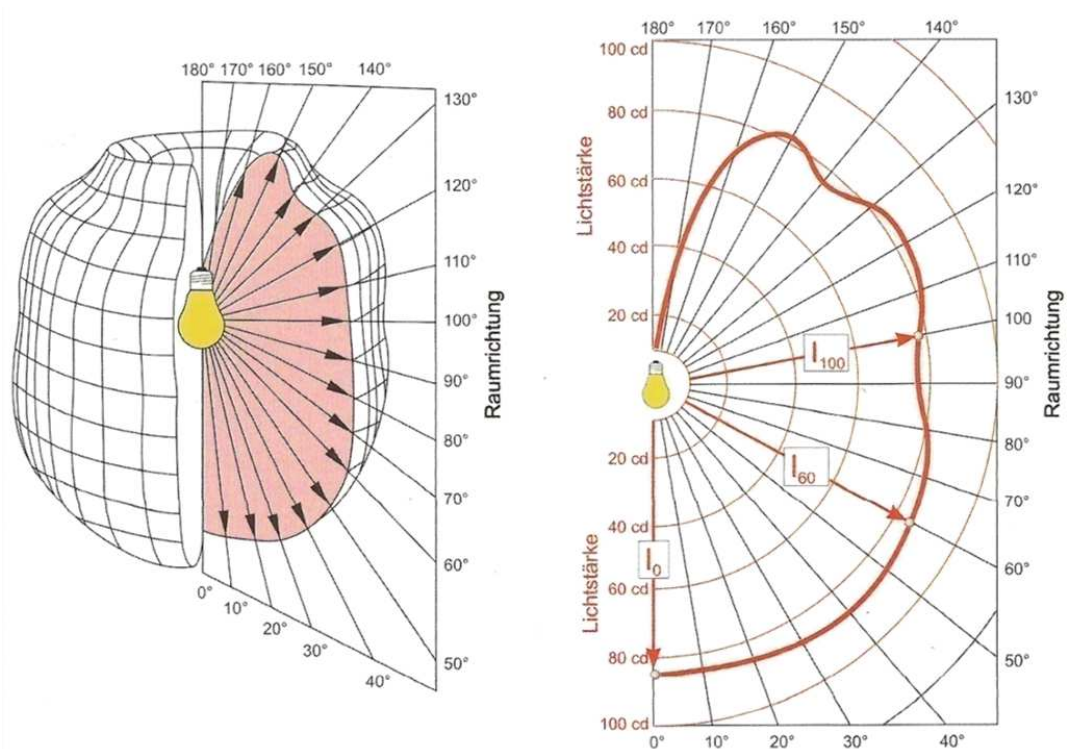


Abbildung 3: Lichtverteilung⁷

Zur Berechnung und Simulation von Beleuchtungssituationen wird die Lichtverteilung im EULUMDAT Format, mit der Endung *.ldt, eingesetzt. Dieses Format wurde als Grundlage für alle Hersteller zur einheitlichen Zurverfügungstellung von Lichtverteilungskurven entwickelt. Dieses Format wird vor allem in Europa verwendet und macht Leuchten untereinander erst vergleichbar.⁸ Neben den Lichtstärkewerten je Raumwinkel sind in diesem Format

⁷ Vgl. C. Bartenbach (2009), S.19

⁸ Vgl. K. Bright, G. Cook (2010), S.208

auch andere Daten zur Leuchte, wie beispielsweise Abmessungen, Leistungsdaten, Lichtströme, Lichtfarben oder Farbwiedergaben hinterlegt. In einer Leuchte können mehrere Leuchtmittel zur Auswahl gestellt werden.

Wenn ein Leuchtenhersteller technische Leuchten anbieten und verkaufen will, muss er Dateien im EULUMDAT Format für seine Produkte anbieten.

2.1.2.6. Reflexionskoeffizient

Der von einer Oberfläche reflektierte Lichtstrom Φ dient, als lichttechnische und energetische Größe, zur Beschreibung des Reflexionsgrades. Dieser beschreibt eine diffuse Reflexion von Licht durch eine Oberfläche. Für den Straßenbeleuchtungsbereich wird der Reflexionskoeffizient q_0 verwendet, bei diesem wird, im Gegensatz zum Reflexionsgrad, die reflektierende Leuchtdichte auf die Beleuchtungsstärke, die auf dem Material herrscht, bezogen. Der Reflexionskoeffizient definiert das Reflexionsverhalten der Fahrbahn in den unterschiedlichen Raumwinkeln.⁹

Der q_0 Wert wird vor allem für die Berechnung und Bewertung von Straßen in den ME Klassen benötigt, in welcher die Leuchtdichte der Fahrbahn in einem bestimmten Abstand zum Beleuchtungs- und Messfeld berechnet wird. Die verschiedenen Klassen, laut Norm, werden in einem späteren Kapitel aufgelistet und erklärt.

⁹ Vgl. Gall (2007), S.48 ff.

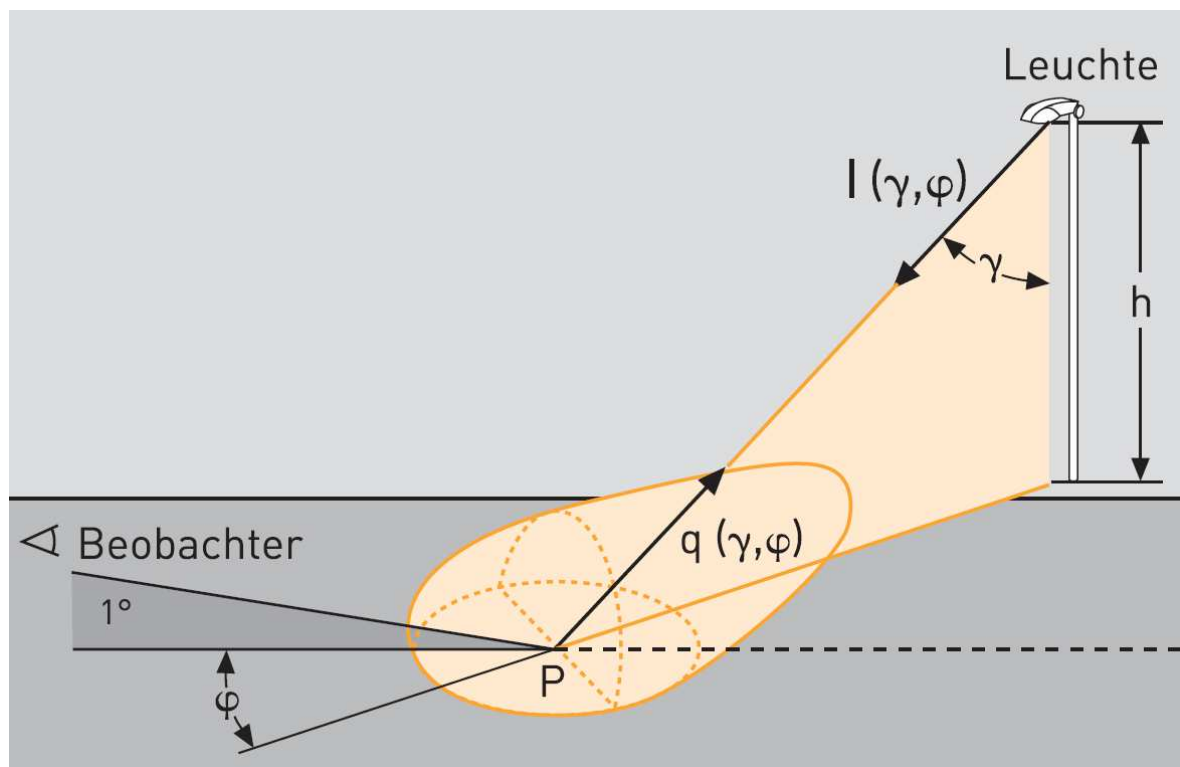


Abbildung 4: Reflexionskoeffizient¹⁰

2.1.2.7. Lichtfarbe und Farbwiedergabe

Der Mensch kann nur Licht im Wellenlängenbereich von 380nm-780nm wahrnehmen und als Licht und Farbe sehen. Die Zusammensetzung dieses sichtbaren Bereiches bestimmt Lichtfarbe und die Farbwiedergabe.

Die Eigenfarbe des, von einer künstlichen Lichtquelle, abgestrahlten Lichts ist die Lichtfarbe. Eine niedrige Farbtemperatur, gemessen in Kelvin (K), beschreibt eine warme Lichtfarbe, z.B. Natriumdampflampen oder Halogenlampen mit Lichtfarben unter 3300K. Dieses bezeichnet man als warmweißes Licht. Den Bereich von 3300K bis 5300K nennt man neutralweißes Licht, über 5300K wird als Tageslichtweiß oder auch Kaltweiß bezeichnet. Das Tageslicht selbst erzeugt bei bedecktem Himmel in etwa 6500K.

Der Farbwiedergabewert R_a gibt darüber Auskunft, wie unverfälscht die Farben, von mit Kunstlicht beleuchteten Flächen und Objekten, wahrgenommen werden.

¹⁰ Vgl. Trilux-Lenze (2009), S.74

Liegt der R_a bei 100, so ist die Farbwiedergabe optimal und alle Farben werden natürlich wiedergegeben. Die in der Straßenbeleuchtung häufig verwendete Natriumdampf-Hochdrucklampe erreicht nur einen sehr niedrigen Wert von R_a 25, mit modernen LED Straßenleuchten sollten auf jeden Fall Werte >80 erreicht werden können. Eine gute Farbwiedergabe dient dem Sehkomfort und der guten Erkennbarkeit von Fußgängern und Hindernissen auf der Fahrbahn.¹¹

2.1.2.8. ULR - upward light ratio

Der ULR beschreibt den Prozentanteil des Lichtstroms, der in den oberen Halbraum, von der Horizontalen aus betrachtet, abgegeben wird. Diese Größe ist im eingebauten Zustand zu bewerten, d.h. falls die Leuchte geneigt verbaut wird, ist dieser Anstellwinkel für die Bewertung ebenfalls zu berücksichtigen.¹² Der ULR Wert spielt eine große Rolle in der Lichtemissionsthematik, ein ULR von 0% ist bei neuen Anlagen auf jeden Fall anzustreben.

2.1.3. Leuchtentypen

In der Straßenbeleuchtung werden drei Leuchtentypen unterschieden. Das sind technische, dekorative und nostalgische Leuchten. Alte Bestandsanlagen, aus dem dekorativen oder nostalgischen Bereich, erfüllen sehr selten alle gültigen Vorschriften hinsichtlich Lichttechnik, die Elektrotechnik wird in dieser Arbeit außen vor gelassen.

Gerade in Hinblick auf gültige Normen und Vorschriften zum Thema Lichtmissionen, z.B. ÖNORM O1052, schneiden dekorative und nostalgische Beleuchtungselemente sehr schlecht ab. Leuchten in Kugelform bzw. frei strahlend oder mit diffusen Abdeckungen, ohne Reflektortechnik, erfüllen die vorgeschriebenen ULR Werte nicht. Solche Leuchten kommen außerdem in den seltensten Fällen den Anforderungen für eine gut beleuchtete Straße nach. Es

¹¹ Vgl. licht.de, Straßen, Wege und Plätze (2014), S.9

¹² Vgl. Trilux-Lenze (2009), S.222

müssen für eine moderne Straßenbeleuchtung also, teilabgeschirmte oder abgeschirmte Leuchten, mit guter Reflektor oder Linsentechnik eingesetzt werden.

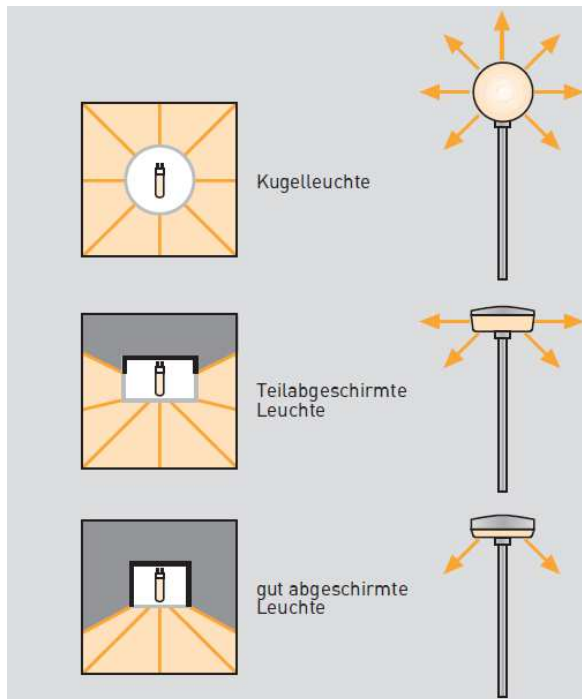


Abbildung 5: Leuchtentypen¹³

2.1.4. Lampentypen

Licht wird durch ein Leuchtmittel erzeugt, welches durch Umwandlung von elektrischer Energie, in sichtbare Strahlung auf eine der folgenden Arten geschieht:

- hohe Temperatur (Temperaturstrahler)
- Gasentladung (Entladungslampen)
- elektronische Vorgänge in Festkörpern (Elektrolumineszenz)

Im Folgenden werden die wichtigsten Leuchtmittel, welche am häufigsten im Straßenbeleuchtungsbereich zum Einsatz kommen, beschrieben.

¹³ Vgl. Trilux-Lenze (2009), S.227

2.1.4.1. Glühlampen

Die Glühlampe besteht aus einem Wolframdraht, dieser wird durch den elektrischen Widerstand erhitzt und erzeugt dabei Licht. Der Wolframdraht befindet sich in einem Glaskolben, welcher evakuiert oder mit Stickstoff bzw. einem Edelgas gefüllt ist. Eine Edelgasfüllung steigert die Effizienz der Glühlampe, genauso wie eine doppelte Wendelung des Widerstanddrahtes. Die mittlere Lebensdauer von Standardglühlampen, das ist jene Zeit die 50% aller Lampen unter Normalbetrieb erreichen, liegt bei ca. 1000h. Die Glühlampe hat mit ca. 10-15 lm/W eine sehr schlechte Lichtausbeute und wurde deshalb mit Festlegung der EU Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG verboten und somit vom Markt genommen. Dieses Leuchtmittel spielt in der Beleuchtung keine Rolle mehr.

Die moderne Variante der klassischen Glühlampe ist die Halogenlampe, bei welcher der Glaskolben mit Halogengas gefüllt ist. Großer Vorteil dieser Technik ist eine höhere Lichtausbeute von bis zu ca. 25 lm/W. Betrieben wird die Halogenglühlampe als Hochvoltlampe ohne Netzteil mit 230V, oder als Niedervoltleuchtmittel mit 6,12 oder 24V. Dieser Lampentyp wird ebenfalls in den nächsten Jahren aufgrund gesetzlicher Regelungen vom Markt verschwinden.

2.1.4.2. Niederdruckentladungslampen

Zu den Niederdruckentladungslampen gehören die Leuchtstofflampe und die Natriumdampf-Niederdrucklampe.

Die Leuchtstofflampe zählt zu den Quecksilber-Niederdrucklampen und wandelt die in der Niederdruckentladung entstehende UV-Strahlung in sichtbares Licht um. Für den Außenbereich ist die Beleuchtung mit Leuchtstofflampen aufgrund des Lichtstromrückgangs von bis zu 50% bei niedrigen Umgebungstemperaturen, zumindest in kalten Regionen, eher schlecht geeignet. Trotzdem sieht man dieses Leuchtmittel sehr häufig im Straßenbeleuchtungsbereich, was vor allem an der guten Lichtausbeute von ca. 100 lm/W und der guten Farbwiedergabe liegt.

Natriumdampf-Niederdrucklampen enthalten festes Natrium und als Füllgas Argon, Neon oder Xenon. Bei der Zündung erscheint dieses Leuchtmittel einige

Minuten in rötlicher Lichtfarbe, bis das in festem Zustand vorliegende Natrium verdampft ist. Das abgestrahlte Licht erkennt man an der typischen gelben monochromatischen Lichtfarbe. Mit diesem Leuchtmittel sind Lichtausbeuten bis 180 lm/W möglich, allerdings spricht die schlechte Farbeigenschaft gegen den Einsatz dieses Leuchtmittels in der modernen Straßenbeleuchtung.¹⁴

2.1.4.3. Hochdruckentladungslampen

Zu den für die Straßenbeleuchtung wichtigsten Hochdruckentladungslampen zählen die Halogen-Metall dampflampen und Natriumdampf-Hochdrucklampen.

Die hocheffiziente und sehr lichtstarke Halogen-Metall dampflampe erzielt durch Zusätze von Halogenverbindungen verschiedener Metalle eine sehr hohe Lichtausbeute und gute Farbwiedergabe.¹⁵

Die Lichterzeugung erfolgt in einem Kolben, in welchem sich ein Plasma befindet, welches aus einem unter hohem Druck stehenden Metall dampfgemisch besteht. Hochdrucklampen benötigen ein Zündgerät und erreichen die volle Helligkeit erst nach einigen Minuten, die Leuchte kann bei älteren Modellen nicht aus- und wieder eingeschalten werden, sondern muss vor dem Neustart abkühlen. Neuere Technik beherrscht auch das Wiederzünden im heißen Zustand.

Bei den Hochdrucklampen wird zwischen Quecksilberdampf-Hochdrucklampen, Halogen-Metall dampflampen und Natriumdampf-Hochdrucklampen unterschieden.

Quecksilberdampflampen sind seit dem Jahr 2015 EU-weit verboten und dürfen nicht mehr verkauft werden. Davon abgesehen hatte dieses Leuchtmittel ohnehin eine sehr geringe Lichtausbeute (ca. 60 lm/W) und eher schlechte Farbwiedergabeeigenschaften.

Die Halogen-Metall dampflampe hat die Quecksilberdampflampe in den meisten Anwendungen schon länger abgelöst. Der Brenner dieses Leuchtmittels besteht

¹⁴ Vgl. Trilux-Lenze (2009), S.336 ff.

¹⁵ Vgl. licht.de Die Beleuchtung mit künstlichem Licht (2014), S.32

aus einem Quarz- oder Keramikkbrenner. Dieses Leuchtmittel hat sehr gute Farbwiedergabeeigenschaften und ist mit >100-120 lm/W sehr effizient.

Natriumdampf-Hochdrucklampen haben einen Brenner aus Aluminiumoxid, welcher mit einer Mischung aus Quecksilber und Natrium gefüllt ist. Die Lichtausbeute ist sehr hoch (ca. 120-130lm/W), die Farbwiedergabe ist schlecht und das Licht ist durch seine orange-gelbe Farbe bekannt. Viele alte Beleuchtungsanlagen sind mit dieser Technik ausgestattet.¹⁶

2.1.4.4. LED

LEDs bestehen aus einem speziellen Halbleiter der Licht emittiert, wenn durch den Festkörper Strom fließt. Mit einer Kantenlänge von einem Millimeter pro Chip ist die LED die kleinste verfügbare Lichtquelle, auf die man zurückgreifen kann.

Der Halbleiter der LED besteht aus einem Grundhalbleiter, welcher negativ leitend ist, der einen Überschuss an Elektronen aufweist. Darüber wird eine dünne positiv leitende Halbleiterschicht mit einem Mangel an Elektronen platziert. Man spricht bei dem Mangel bildlich von „Löchern“ in dieser Schicht. Unter Spannung wandern die überschüssigen Elektronen und diese Löcher aufeinander zu und rekombinieren in der Sperrschicht, dort wird die freigesetzte Energie in Licht und Wärmeenergie umgewandelt. Die LED Chips werden zum Schutz meistens in eine Kunststoffummantelung gegossen, neben der Schutzfunktion verbessert diese Kunststoffhülle den Lichtaustritt.¹⁷

Vorteile der LEDs sind eine hohe Helligkeit und Intensität, eine hohe Effizienz und eine lange Lebensdauer. Abgesehen davon strahlt sie, wie viele andere Lichtquellen, kein UV Licht ab und ist mit dem entsprechenden Netzteil einfach zu programmieren und zu steuern.

Das größte Problem stellt bei der LED die Wärmeentwicklung auf kleinster Fläche dar. So bedeutet jedes Grad höhere Temperatur am Chip höhere Stromaufnahme

¹⁶ Vgl. Trilux-Lenze (2009), S.334 ff.

¹⁷ Vgl. <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/modern-und-effizient-leds/die-lichtquelle-led/das-led-funktionsprinzip/>, 19.09.2015

und eine kürzere Lebensdauer. Deshalb ist es unerlässlich eine gute Leuchte als Gesamtsystem auf diesen Umstand hin zu designen und ausreichend Kühlfläche zur Verfügung zu stellen, um die Temperatur am Chip möglichst niedrig zu halten.¹⁸ Die LED kann aktuell mit einem $Ra > 90$ und einer Effizienz über 150lm/W, abhängig von der Lichtfarbe, eingekauft werden.

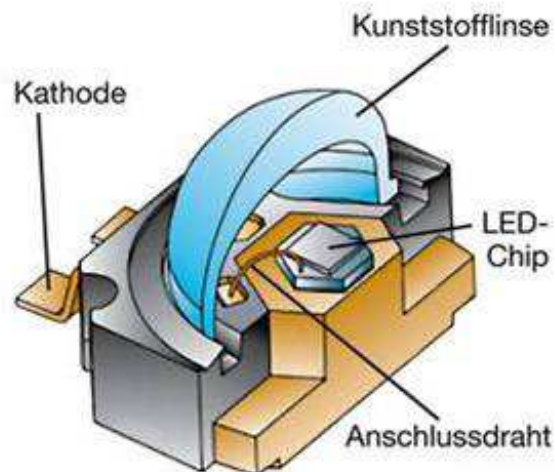


Abbildung 6: Prinzip LED¹⁹

2.1.5. Berechnungsklassen nach EN 13201

Die Beleuchtungsklassen werden durch verschiedene photometrische Anforderungen definiert. Diese Anforderungen hängen stark von den visuellen Notwendigkeiten der einzelnen Straßenverkehrsteilnehmer in den verschiedenen Arten von Verkehrsflächen und deren angrenzenden Flächen ab. Man findet in der Norm ME, CE, S, A und EV Klassen.

Die ME-Klassen wurden für den motorisierten Verkehr, in mittleren bis höheren Geschwindigkeiten, eingeführt. Dazu gibt es CE Klassen, die die Anforderungen in Konfliktbereichen, wie z.B. Einkaufsstrassen oder komplexen Kreuzungen,

¹⁸ Vgl. N. Thiemann, M. Aigner (2013), S.108-109

¹⁹ Vgl. <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/modern-und-effizient-leds/die-lichtquelle-led/das-led-funktionsprinzip/>, 19.09.2015

berücksichtigen. ME Klassen nutzen zur Bewertungsgrundlage die Leuchtdichte der Fahrbahn, die CE Klasse die horizontale Beleuchtungsstärke.

Die S- und A-Klassen sind zur Anwendung auf Flächen (Fuß- und Radwegen oder Standstreifen) vorgesehen, die getrennt von, oder entlang der Fahrbahn von Verkehrswegen liegen. Diese Klassen werden durch die horizontale Beleuchtungsstärke bewertet.

In Fällen, wo eine vertikale Beleuchtung von Objekten oder Personen notwendig ist, werden die sogenannten ES und EV Klassen eingesetzt. Die ES Klassen haben das Ziel das Kriminalitätsrisiko zu senken, in dem man die gute Erkennbarkeit von Personen sicherstellt, die EV Klasse kommt z.B. bei Mautstellen oder Anschlussstellen zum Einsatz. Die ES-Klasse wird durch die halbzyklindrische Beleuchtungsstärke und die EV-Klassen durch die vertikale Beleuchtungsstärke definiert.

Neben den Beleuchtungsklassen gibt es in dieser Norm auch noch die Lichtstärkeklassen G, zur Begrenzung der physiologischen Blendung und die Blendindexklassen D, zur Begrenzung der psychologischen Blendung. Diese beiden Klassen sind hauptsächlich für Verkehrsflächen vorgesehen, die auch von Fußgängern und Radfahrern benutzt werden.²⁰

Begriffe zur Anwendung der Norm laut ÖNORM EN 13201-2:

- **mittlere Fahrbahnleuchtdichte der Straßenoberfläche** (der Fahrbahn einer Straße) (**L**): mittlere Leuchtdichte der Straßenoberfläche, gemittelt über die Fahrbahn
- **Längsgleichmäßigkeit** (der Leuchtdichte auf der Straßenoberfläche eines Fahrstreifens): Verhältnis von niedrigster und höchster Leuchtdichte auf der Straßenoberfläche, die in der Mitte eines Fahrstreifens gemessen wird

²⁰ Vgl. ÖNORM EN 13201-2, S.3ff

- **Längsgleichmäßigkeit** (der Leuchtdichte auf der Straßenoberfläche einer Fahrbahn) (**UI**): die geringste Längsgleichmäßigkeit auf einem der Fahrstreifen der bewerteten Fahrbahn
- **Schwellenwerterhöhung (TI)**: Wert für die Verringerung der Sichtbarkeit eines Objektes auf der Fahrbahn, infolge der durch die Leuchten der Straßenbeleuchtung erzeugten physiologischen Blendung.
- **Umgebungsbeleuchtungsstärkeverhältnis** (einer Fahrbahn oder Straße) (**SR**): Verhältnis zwischen der mittleren Beleuchtungsstärke auf einem Streifen neben der Fahrbahn und der mittleren Beleuchtungsstärke auf einem Bereich unmittelbar innerhalb der Fahrbahn
- **mittlere Beleuchtungsstärke** (auf einer Straßenfläche) (**\bar{E}_{hs}**): mittlere horizontale Beleuchtungsstärke auf einer bestimmten Straßenfläche
- **minimale Beleuchtungsstärke** (auf einer Straßenfläche) (**E_{min}**): niedrigste Beleuchtungsstärke auf einer Straßenfläche
- **halbsphärische Beleuchtungsstärke** (auf einem Punkt der Straßenfläche) (**E_{hs}**): Lichtstrom durch eine kleine Halbkugel mit horizontaler Basis, dividiert durch die Oberfläche der Halbkugel
- **mittlere halbsphärische Beleuchtungsstärke** (auf der Straßenfläche) (**\bar{E}**): über die Straßenfläche gemittelte Beleuchtungsstärke im Halbraum
- **Gesamtgleichmäßigkeit** (der Fahrbahnleuchtdichte, der horizontalen oder halbsphärischen Beleuchtungsstärke) (**U_o**): Verhältnis des niedrigsten zum mittleren Wert
- **Wartungswert** (der mittleren Fahrbahnleuchtdichte, der mittleren oder minimalen Beleuchtungsstärke einer Straßenfläche, der mittleren

Beleuchtungsstärke im Halbraum, der minimalen Beleuchtungsstärke im halbzyllindrischen Raum oder der minimalen vertikalen Beleuchtungsstärke): Niveau, unter welches der Wert der entsprechenden Größe zu keiner Zeit während des Betriebes absinken darf.

- **halbzyllindrische Beleuchtungsstärke** (an einem Punkt) (**Esc**): gesamter Lichtstrom, der durch die gekrümmte Oberfläche eines sehr kleinen Halbzyllinders fließt, dividiert durch die gekrümmte Oberfläche des Halbzyllinders. Die Richtung der Normalen auf der Basis des Halbzyllinders gibt die Orientierungsrichtung des Halbzyllinders an
- **minimale halbzyllindrische Beleuchtungsstärke** (in einer Ebene über der Straßenfläche) (**Esc,min**): niedrigste halbzyllindrische Leuchtdichte in einer Ebene, die 1,5 m über der Straßenoberfläche liegt
- **vertikale Beleuchtungsstärke** (an einem Punkt) (**Ev**): Beleuchtungsstärke in einer senkrechten Ebene
- **minimale vertikale Beleuchtungsstärke** (in einer Ebene oberhalb der Straßenfläche) (**Ev,min**): niedrigste vertikale Beleuchtungsstärke in einer bestimmten Höhe über der Straßenfläche²¹

Üblicherweise findet man in Ausschreibungen entweder Vorgaben zu ME oder S Klassen, je nachdem um welche Straßen es sich handelt. In den ME-Beleuchtungsklassen geht man von trockener Fahrbahn aus, damit legt man Straßen z.B. in Österreich und Deutschland aus. In manchen Ländern sind die Fahrbahnen über Nacht großteils feucht oder nass, dadurch entsteht eine erhöhte Anforderung an die Gleichmäßigkeit U_0 , um schlechten Sichtbedingungen bei nasser Straße vorzubeugen.

²¹ Vgl. ÖNORM EN 13201-2, S.5ff

Für die ME-Klassen gelten die Werte:

Klasse	Fahrbahnleuchtdichte bei trockener Straßenoberfläche			Schwellenwert- erhöhung	Umgebungs- Beleuchtungs- stärkeverhältnis
	\bar{L} in cd/m ² [Wartungswert]	U_o [Mindestwert]	U_l [Mindestwert]	T/I in % ^a [Höchstwert]	SR ^b [Mindestwert]
ME1	2,0	0,4	0,7	10	0,5
ME2	1,5	0,4	0,7	10	0,5
ME3a	1,0	0,4	0,7	15	0,5
ME3b	1,0	0,4	0,6	15	0,5
ME3c	1,0	0,4	0,5	15	0,5
ME4a	0,75	0,4	0,6	15	0,5
ME4b	0,75	0,4	0,5	15	0,5
ME5	0,5	0,35	0,4	15	0,5
ME6	0,3	0,35	0,4	15	keine Anforderung
^a Ein um 5 % erhöhter T/I -Wert kann bei der Verwendung von Lichtquellen mit geringer Leuchtdichte zugelassen werden (siehe Anmerkung 6).					
^b Dieses Kriterium ist nur zu verwenden, wenn keine Verkehrsflächen mit eigenen Anforderungen an die Fahrbahn angrenzen.					

Tabelle 1: ME Beleuchtungsklassen²²

Die S-Klassen der Tabelle 2 gelten für Fußwege, Radwege, Standstreifen und andere Flächen die getrennt oder entlang einer Verkehrsfläche liegen. Außerdem werden mit der S-Klasse auch Anwohnerstraßen, Parkplätze, Schulhöfe, usw. geplant.

ES und EV Klassen sind zusätzliche Klassen, welche in Situationen zum Einsatz kommen, wo eine höhere Erkennbarkeit gegeben sein muss. ES Klassen werden eingesetzt, um die Erkennbarkeit von Personen zu erhöhen, das subjektive Sicherheitsgefühl von Fußgängern zu erreichen und damit das Kriminalitätsrisiko zu senken. Die EV Klassen gelten für Gefahrenbereiche wie Kreuzungen, Anschlussstellen, usw.

²² Vgl. ÖNORM EN 13201-2, S.7

Klasse	Horizontale Beleuchtungsstärke	
	\bar{E} in lx ^a [Wartungswert]	E_{\min} in lx [Wartungswert]
S1	15	5
S2	10	3
S3	7,5	1,5
S4	5	1
S5	3	0,6
S6	2	0,6
S7	unbestimmte Anforderung	unbestimmte Anforderung
^a Um eine gewisse Gleichmäßigkeit sicherzustellen, darf der tatsächliche Wert der mittleren Beleuchtungsstärke das 1,5fache des für die Klasse vorgesehenen Mindestwertes nicht überschreiten.		

Tabelle 2: S Beleuchtungsklassen²³

Für die weiteren Analysen werden die Klassen auf ME und S-Beleuchtungsklassen beschränkt.

2.2. Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse

Neben den technischen Aspekten gibt es die wirtschaftlichen Entscheidungseinflüsse, welche, wenn eine technisch beinahe gleichwertige Lösung vorliegt, meistens ausschlaggebend sind für eine Entscheidung. Um die Produktauswahl aus allen Blickwinkeln betrachten zu können, werden in dieser Arbeit die Verfahren der Rentabilitäts- und Amortisationsrechnung angewandt, um die subjektiven Entscheidungskriterien einfließen zu lassen, wird ergänzend eine Nutzwertanalyse durchgeführt.

2.2.1. Rentabilitätsrechnung

Zu den statischen Verfahren zählen die folgenden Methoden:

- Kostenvergleichsrechnung
- Gewinnvergleichsrechnung

²³ Vgl. ÖNORM EN 13201-2, S.10

- Rentabilitätsrechnung
- statische Amortisationsrechnung

Die Rentabilitätsrechnung ist eine statische Methode, welche sich im Gegensatz zur Kostenvergleichs- und Gewinnvergleichsrechnung nicht nur auf Erlöse und Kosten bezieht, sondern Erlöse (E), Kosten (K) und das eingesetzte Kapital (D) verschiedener Investitionen miteinander vergleicht.²⁴

Formel 4: Rentabilität

$$Rt = \frac{E - K}{D} * 100 = \frac{G}{D} * 100$$

Die Rentabilität wird in Prozent angegeben.

Gewinn = Stückerlös * Menge
- fixe Grundkosten
- variable Stückkosten * Menge
- Abschreibung
- kalkulatorische Zinsen

Diese Annahme gilt für eine Produktions- oder Fertigungsinvestition und kann auf diese Aufgabe mit folgender Änderung umgelegt werden.

Gewinn = Erlös Stromeinsparung
- fixe Grundkosten
- zusätzliche Kosten
- Abschreibung
- kalkulatorische Zinsen

²⁴ Vgl. W. Hoffmeister (2008), S.49

Ziel der Investoren ist hier eine möglichst hohe Verzinsung des eingesetzten Kapitals.

2.2.2. Amortisationsrechnung

Folgende Grundannahmen gelten für diese Verfahren:

1. Zur Beurteilung einer Investition werden Ergebnisgrößen, wie Kosten und Leistung herangezogen.
2. Es wird nicht die Summe der gesamten Kosten oder Leistungen über die Nutzungsdauer betrachtet, sondern die sich aus den jeweiligen Summen ergebenden Durchschnittsgrößen pro Periode, diese Durchschnittsperiode wird als repräsentativ für alle zukünftigen Perioden angesehen.²⁵

Für die Bewertung der unterschiedlichen Straßenbeleuchtungsvarianten wird die statische Amortisationsrechnung herangezogen.

Mittels Amortisationsrechnungen werden die Rückflusszeiten des eingesetzten Kapitals berechnet. Die Berechnung von Amortisationszeiten kann als ergänzendes Hilfsmittel zur Investitionsentscheidung herangezogen werden, sollte aber nicht alleine als einzige Entscheidungsmethode eingesetzt werden, da es bei alleiniger Betrachtung der Amortisationszeiten zu Fehlinvestitionen oder Unterlassung vorteilhafterer Investitionen kommen kann.

Formel 5: Amortisationszeit

$$\text{Amortisationszeit } t_{am} = \frac{\text{Anschaffung}}{\text{jährlicher Rückfluss}}$$

²⁵ Vgl. U. Ermschel, C.Möbius, H.Wengert (2013), S.35

Der jährliche Rückfluss entspricht dem Gewinn addiert mit der Abschreibung bzw. den jährlichen Einnahmen reduziert um die Grundkosten.

Von dieser einfachen Formel kann nur ausgegangen werden, wenn mit konstanten Rückflüssen zu rechnen ist.²⁶

Ist die Amortisationsdauer länger als die Nutzungsdauer, so reicht diese nicht aus, um einen Rückfluss der verauslagten Mittel wieder zurück ins Unternehmen zu gewährleisten. Die Investition ist dann mit Verlust verbunden.²⁷

Gemäß Sicherheitsstreben der Investoren ist die Alternative vorzuziehen, die den Rückfluss der verauslagten Mittel am Schnellsten sicherstellt.

2.2.3. Nutzwertanalyse

Da es zum Thema Straßenbeleuchtung sehr viele nicht monetäre Größen gibt, welche oft in der Entscheidungsfindung nicht ausreichend berücksichtigt werden, bietet sich hier zur Bewertung die Nutzwertanalyse an. Eine Nutzwertanalyse kann eine Entscheidungsfindung nicht alleine übernehmen, sie bietet aber eine gute Unterstützung, da eine vollständige Berücksichtigung aller relevanten Parameter möglich ist, eine Senkung des Risikos von Fehlentscheidungen ist damit möglich.²⁸ Innerhalb eines Entscheidungsprozesses hilft die Nutzwertanalyse bei der Auswahl komplexer Handlungsalternativen, die Möglichkeiten werden zum Zweck der Auswahl der besten Entscheidung beurteilt.

Die Nutzwertanalyse unterstützt

- bei der transparenten Darstellung von Entscheidungsproblemen
- bei der Integration von subjektiven Elementen in die Entscheidungsfindung
- bei der Vermeidung bzw. Verringerung des Risikos von Fehlentscheidungen
- beim Aufzeigen von Lösungsalternativen und deren Konsequenzen

²⁶ Vgl. W. Hoffmeister (2008), S.79

²⁷ Vgl. U. Ermschel, C.Möbius, H.Wengert (2013), S.32

²⁸ Vgl. J.N. Stelling (2009), S.313

Bei der Nutzwertanalyse können Daten in Ordinal- und Kardinalskalen verarbeitet werden. Bei der Ordinalskala werden Ergebnisse nur nach der Reihenfolge der gemessenen Daten geordnet und dann zahlenmäßig geordnet, z.B. eine Rangfolge nach „sehr gut“-„gut“-„befriedigend“-„ausreichend“-„mangelhaft“. Auf diese Weise können Bewertungen in Zahlen gefasst und danach einfacher verglichen werden.

Die kardinal skalierte Bewertung erfolgt anhand von in Zahlen messbaren Werten, diese lassen sich einfacher und objektiver als ordinale Skalenwerte vergleichen.²⁹

Vorgehensweise bei der Nutzwertanalyse

- festlegen der Kriterien
- Skalierung der Werte und Festlegung der Zielerreichungsgrade
- Gewichtung zu den Kriterien festlegen
- Zielerreichungsgrade gewichten
- Aus den gewichteten Werten die Nutzensumme bilden

		Variante1		Variante2	
Kriterium	Gewichtung	Ziel- erreichungs- grad	Nutzwert	Ziel- erreichungs- grad	Nutzwert
Krit. 1	0,6	8	4,8	4	2,4
Krit. 2	0,8	5	4	8	6,4
Krit. 3	0,4	3	1,2	9	3,6
		Summe 1	10	Summe 2	12,4

Tabelle 3: Beispiel Nutzwertanalyse

²⁹ Vgl. W. Hoffmeister (2008), S278 ff.

Variante 2 erzielt in diesem einfachen Beispiel den höheren Nutzwert und wäre hier die bessere Entscheidung.

Problem bei der Nutzwertanalyse ist die Ungenauigkeit, welche Schätzwerte mit sich bringen. Wenn, dann lässt eine kardinal skalierte Bewertung eine objektive Bewertung zu. Allerdings ist die Nutzwertanalyse bei ordinalen Werten eine gute Möglichkeit subjektive Bewertungen von Entscheidungsträgern systematisch darzustellen und vergleichbar zu machen.³⁰

³⁰ Vgl. W. Hoffmeister (2008), S.307 ff.

3. Technische Betrachtung der Umrüstung

3.1. Allgemeines zur Umrüstung

Ein Vergleich der Beleuchtung mit alter Technik ist oft nicht sinnvoll, da diese kaum mehr zum Einsatz kommen und auch teilweise bereits verboten sind. Eine moderne LED Beleuchtungslösung ist einer alten Anlage, älter als 10-15 Jahre, sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht, auf jeden Fall überlegen. Darum wird der Vergleich mit moderner, konventioneller Technik am Beispiel der Philips Cosmopolis angestellt.

3.2. Abgrenzung und Problem der Umrüstung

Ein sehr großes Problem bei der wirtschaftlichen Betrachtung von Straßenbeleuchtungsanlagen ist, dass die bewertete Ausgangslage meistens nicht der Norm entspricht und deshalb die Beleuchtungsstärken und Anschlussleistungen bereits zu niedrig sind. Es passiert sehr oft, dass in Amortisationsrechnungen ein Vergleich zwischen nicht normgerechtem Bestand und neuer, der Norm entsprechender, Straßenbeleuchtung angestellt wird.

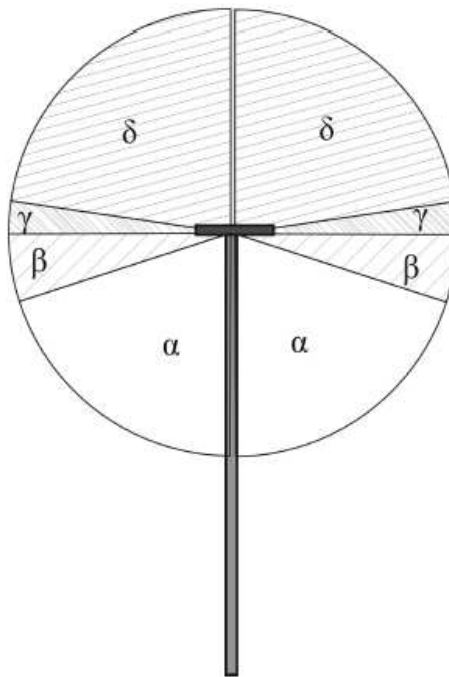
Für die Betrachtung in dieser Arbeit wird eine moderne klassische Straßenleuchte mit konventioneller Technik, auf technisch neuem Stand, mit einer LED Beleuchtung verglichen.

Die Auswahl der LED Leuchte erfolgt nach Recherche und Analyse von mehreren Verteilungen und Lichtstropaketen. Hierzu wurden die Leuchten und deren Lichtverteilungen von mehreren Herstellern gegenübergestellt und bewertet. Ausgewählt wurde eine Leuchte, die einen guten Durchschnitt darstellt.

Um den Anforderungen des Umweltschutzes gerecht zu werden und normkonform zu beleuchten, wird bei der Betrachtung der Systeme ausschließlich mit einer

Lichtfarbe $\leq 3000\text{K}$ gearbeitet - die Anlockwirkung auf Insekten ist unter 3000K am geringsten.^{31 32}

Den Umweltschutz betreffend wird außerdem darauf geachtet, dass keine Leuchte mit einem Ausstrahlwinkel $> 70^\circ$ eingesetzt wird. Dieser beeinflusst die Anlockwirkung von Insekten auch sehr deutlich.



Es bedeutet:

Ausstrahlbereich α : $0^\circ \leq \alpha < 70^\circ$ idealer Ausstrahlwinkel

Ausstrahlbereich β : $70^\circ \leq \beta < 90^\circ$ signifikanter Bereich für die Anlockwirkung auf Tiere

Ausstrahlbereich γ : $90^\circ \leq \gamma < 95^\circ$ kritische Zone für die Anlockwirkung auf Tiere und für die Himmelsaufhellung (In diese Richtung abgestrahltes Licht ist auch aus großer Entfernung wahrnehmbar.)

Ausstrahlbereich δ : $95^\circ \leq \delta < 180^\circ$ signifikanter Bereich für Himmelsaufhellung

Abbildung 7: Ausstrahlwinkel einer Leuchte (Prinzipskizze)³³

³¹ Vgl. Die helle Not - Wenn Licht zum Problem wird (2012), S.5

³² Vgl. ÖNORM O 1052:2012, S.12

³³ Vgl. ÖNORM O 1052:2012, S.13

Vollständig außen vor gelassen wird das Design und Erscheinungsbild der jeweiligen Leuchte. Im folgenden technischen Vergleich wird nur der lichttechnische Aspekt betrachtet.

3.3. Konventionelles Vergleichssystem

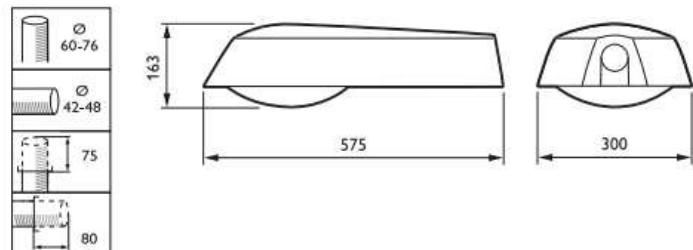
3.3.1. Leuchte

Es wird bewusst eine Leuchte ausgewählt, die eine klassische Straßenleuchtenoptik aufweist. Die Leuchte ist eine Weiterentwicklung der sehr bekannten Kofferleuchte, mit dem Ziel der Maximierung der Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit. Im Fokus der Entwicklung standen die Gesamtkosten während der Nutzlebensdauer der Leuchte.

Es gibt zwei Varianten der Leuchte, das ist zum einen die Koffer² 70, für Montagehöhen von 3,5-7m und die Koffer² 100, für Montagehöhen von 6-12m. Im Wesentlichen liegt der Unterschied zwischen den beiden Leuchten im Design bzw. der Außenabmessungen der Leuchte. Betrachtet man das optische Erscheinungsbild der Leuchte, so wäre z.B. die Koffer² 100 Leuchte zu groß für niedrige Höhen, und umgekehrt die Koffer² 70 Leuchte zu klein für z.B. 12m. In der Vergleichsberechnung wird unabhängig von der Höhe dieselbe Lichtverteilung verwendet.



Abmessungsskizzen



SGP070 CPO-TW140W K EB II GB AL SI

Produkt Daten

• Allgemeine Informationen

Produktfamilie	SGP070 [Technische Straßenleuchte]
Anzahl Lichtquellen	1 [1 x]
Lampenfamilie	CPO-TW [Keramikmetallhalogendampflampe]
Lampenleistung	140 W [140 W]
Kombipack	K [Inklusive Lampe]
Vorschaltgerät	EB [Elektronisches Vorschaltgerät]
Schutzklasse	II [SK 2]
Schutzart	IP66 [IP 66]
Schlagfestigkeit (IK)	IK08 [5 J]
Wanne, Abdeckung	GB [Glaswanne/-abdeckung]
Farbige Leuchtenteile	AL [alle Teile eingefärbt]
RAL Farbe	RAL9006 [Weißaluminium]
Zündgerät	No [-]
Sicherheitsbeleuchtung	nein [-]
Lichtsteuerung	Nein [Nein]
Lichtsteuerung	No [-]
Fotозelle	Nein [-]
Messerkontakt	No [-]
Kabel	No [-]
CE-Zeichen	CE [CE-Zeichen]
ENEC-Zeichen	ENEC [ENEC Zeichen]

• Lichttechnische Eigenschaften

Standardaufneigung	10 [10°]
Aufsatzmon.	

• Elektrische Kenndaten

Netzspannung	220-240 V [220 - 240 V]
--------------	-------------------------

• Produktdaten

Bestellnummer	227075 00
Produktcode	403073222707500
Produktname	SGP070 CPO-TW140W K EB II GB AL SI
Bestellbezeichnung	SGP070 CPO-TW140W K EB II GB AL SI
Anzahl pro Verpackung	0
Verpackungsanzahl pro Umverpackung	1
Barcode auf Umverpackung (EAN3)	4030732227075
12 NC	910616593521

Abbildung 8: Technische Daten konventionelles System³⁴

3.3.2. Leuchtmittel

Als Leuchtmittel kommt in dieser Leuchte die Weiterentwicklung der klassischen Metalldampflampe, die sogenannte CosmoPolis der Firma Philips, zum Einsatz. Dieses Leuchtmittel wurde speziell für den Einsatz in Außenleuchten entwickelt, mit dem Ziel die Effizienz der Beleuchtung zu steigern. Die klassische

³⁴ Vgl. <http://www.ecat.lighting.philips.de/l/technische-trassenleuchten/aufsatzleuchten/koffer2-sgp070/20498/cat/#>, 09.07.2015

Halogenmetall dampflampe weist bei 3000K eine Lichtausbeute von ca. 90 lm/W, bei einer Umgebungstemperatur von 25°C, auf³⁵.

Mit der CosmoPolis sind unter denselben Bedingungen mit 3000K laut Herstellerangaben 125 lm/W möglich. Diese sehr hohe Lichtausbeute ist der Grund, warum in dieser Arbeit nur dieses Leuchtmittel zur Betrachtung herangezogen wird. Zum Vergleich wird einmal das 140W CPO Leuchtmittel herangezogen, einmal die kleinere 60W Variante.

• Allgemeine Eigenschaften

Socket	PGZ12	Farbwiedergabe @	59 -
Kolbenform	T19 [T 19mm]	±60% Leistung	
Kolbenausführung	Klar	Lichtfarbe	Weiß
Brennstellung	beliebig [Beliebig]	Farbtemperatur @	2900 K
Life to 5% failures, horiz.	18000 hr	±60% Leistung	
Lebensd.	20000 hr	Nennlichtstrom EL	17600 Lm
10%Ausfallr.Socket ho.		25°C hor.	
Life to 20% failures, horiz.	24000 hr	Lichtstrom @ ±60%	7900 Lm
Lebensd.	30000 hr	Leistung	
50%Ausfallr.Socket ho.		Nennlichtausbeute	125 Lm/W
LSF EL 2kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	EL25°C S.ho.	
LSF EL 4kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	Lichtausbeute @	95 Lm/W
LSF EL 6kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	±60% Leistung	
LSF EL 8kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	Farbwiedergabeindex, Socket ho.	72 Ra8
LSF EL 12kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	Farbtemperatur, Socket horiz.	2800 K
LSF EL 16kh Nenn-, 12h, S.ho.	97 %	Farbtemp.techn., Socket horiz.	3000 K
LSF EL 20kh Nenn-, 12h, S.ho.	90 %	LLMF EL 2k h	94 %
LSF EL 24kh Nenn-, 12h, S.ho.	80 %	Nenn-, Socket ho.	
LSF EL 30kh Nenn-, 12h, S.ho.	50 %	LLMF EL 4k h	93 %
		Nenn-, Socket ho.	
		LLMF EL 6k h	92 %
		Nenn-, Socket ho.	
		LLMF EL 8k h	91 %
		Nenn-, Socket ho.	
		LLMF EL 12k h	89 %
		Nenn-, Socket ho.	
		LLMF EL 16k h	88 %
		Nenn-, Socket ho.	
		LLMF EL 20k h	87 %
		Nenn-, Socket ho.	
		LLMF EL 24k h	86 %
		Nenn-, Socket ho.	
		Farbkoordinate X	440 -

• Lichttechnische Eigenschaften

Farbkennung	728 [CCT of 2800K]
-------------	--------------------

• Elektrische Kenndaten

Lampenleistung	140 W
Lampen-Nennleistung EL 25°C	140.0 W
Lp.Leistung EL 25°C nominal	140.0 W
Lampenspannung	94 V
Lampenstrom EL	1.50 A
Lampenstrom EL @ ±60% Leistung	912 mA
Zündzeit	30 (max) s
Anlaufzeit (90% Lichtleistung)	4 (max) min
Dimmbar	Ja [Ja]
Wiederzündzeit [s]	900 (max) s
skotopt/photopt. Lichtstrom	1.30 -

Abbildung 9: technische Daten CosmoPolis 140W³⁶

³⁵ Vgl. <http://www.ecat.lighting.philips.de//professionelle-lampen/entladungslampen/keramische-metallhalogendampflampen/master-cosmowhite-cpo-tw-cpo-tw-xtra/19860/cat/?t1=ProductList#t=ProductList&q=cpo>, 11.07.2015

³⁶ Vgl. <http://www.ecat.lighting.philips.de//professionelle-lampen/entladungslampen/keramische-metallhalogendampflampen/master-cosmowhite-cpo-tw-cpo-tw-xtra/19860/cat/?t1=ProductList#t=ProductList&q=cpo>, 11.07.2015

• Allgemeine Eigenschaften		Farbwiedergabe @ 62 -	
Sockel	PGZ12	±60% Leistung	
Kolbenform	T19 [T 19mm]	Lichtfarbe	Weiß
Kolbenausführung	Klar	Farbtemperatur @ 2715 K	
Brennstellung	beliebig [Beliebig]	±60% Leistung	
Life to 5% failures, horiz.	21500 hr	Nennlichtstrom EL 7200 Lm	
Lebensd.	24000 hr	25°C hor.	
10%Ausfallr.Sockel ho.		Lichtstrom @ ±60% Leistung	3240 Lm
Life to 20% failures, horiz.	27000 hr	Nennlichtausbeute EL25°C S.ho.	120 Lm/W
Lebensd.	32000 hr	Lichtausbeute @ ±60% Leistung	90 Lm/W
50%Ausfallr.Sockel ho.		Farbwiedergabeindex, Sockel ho.	70 (min), 73 (nom) Ra8
LSF EL 2kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	Farbtemperatur, Sockel horiz.	2800 K
LSF EL 4kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	Farbtemp.techn., Sockel horiz.	2760 K
LSF EL 6kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	LLMF EL 2k h	92 %
LSF EL 8kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	Nenn-, Sockel ho.	
LSF EL 12kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	LLMF EL 4k h	90 %
LSF EL 16kh Nenn-, 12h, S.ho.	99 %	Nenn-, Sockel ho.	
LSF EL 20kh Nenn-, 12h, S.ho.	97 %	LLMF EL 6k h	90 %
LSF EL 24kh Nenn-, 12h, S.ho.	90 %	Nenn-, Sockel ho.	
LSF EL 30kh Nenn-, 12h, S.ho.	63 %	LLMF EL 8k h	90 %
		Nenn-, Sockel ho.	
		LLMF EL 12k h	89 %
		Nenn-, Sockel ho.	
		LLMF EL 16k h	87 %
		Nenn-, Sockel ho.	
		LLMF EL 20k h	86 %
		Nenn-, Sockel ho.	
		LLMF EL 24k h	84 %
		Nenn-, Sockel ho.	
• Lichttechnische Eigenschaften			
Farbkennung	728 [CCT of 2800K]		
		• Elektrische Kenndaten	
		Lampenleistung	60 W
		Lampen-Nennleistung EL 25°C	60.0 W
		Lp.Leistung EL 25°C nominal	60.0 W
		Lampenspannung	92 V
		Lampenstrom EL	0.644 A
		Lampenstrom EL @ ±60% Leistung	383 mA
		Zündzeit	30 (max) s
		Anlaufzeit (90% Lichtleistung)	3 (max) min
		Dimmbar	Ja [Ja]
		Wiederzündzeit [s]	900 (max) s
		skotopt/photopt.	1.15 -
		Lichtstrom	

Abbildung 10: technische Daten CosmoPolis 60W³⁷

Dieses Leuchtmittel bietet in der 140W Variante eine Lebensdauer von ca. 6 Jahren, gerechnet mit einer angenommenen Brenndauer von 3000h pro Jahr. Das 60W Leuchtmittel hingegen schafft laut Datenblatt, mit 21500h, 3500h mehr und kann damit ein Jahr länger in Betrieb bleiben. Diese Stundenangaben basieren auf der Annahme, dass nach der angegebenen Stundenanzahl 5% der Leuchtmittel ausfallen. Das bedeutet also nicht, dass nach dieser Zeit keines mehr leuchtet, aber man kann anhand dieser Zahl den Wartungszyklus festlegen und einen eventuellen Tausch von ganzen Straßenzügen vorsehen.

³⁷ Vgl. <http://www.ecat.lighting.philips.de/l/professionellelampen/entladungslampen/keramische-metallhalogendampflampen/master-cosmowhite-cpo-tw-cpo-tw-xtra/19860/cat/?t1=ProductList#t=ProductList&q=cpo>, 11.07.2015

3.4. LED Vergleichssystem

Beim LED System gestaltet sich die Auswahl eines Vergleichsystems etwas schwieriger. Leider gibt es immer noch keine einheitliche Plattform auf deren Basis die einzelnen Hersteller Leuchten entwickeln. Es gibt keine Standard Leistungsabstufungen wie es sie bei den konventionellen Systemen gab, wie z.B. bei den Halogenmetall dampflampen mit 35W, 70W und 150W. Deshalb wurde für diese Arbeit eine kleine Marktrecherche durchgeführt, wo Produkte der größeren bekannten Hersteller verglichen wurden, um eine durchschnittliche LED Straßenleuchte für den Vergleich finden zu können. Als Basis für die Produkterhebung wurde die Lichtverteilung der konventionellen Vergleichsleuchte genommen, es wurden nur Lichtsysteme mit einer ähnlichen EULUMDAT in die Auswahl genommen.

Als Ausgangsbasis wurde der Lichtstrom der konventionellen Vergleichsleuchten herangezogen, an dieser orientiert sich die Auswahl der LED Produkte. Die Daten wurden nur von den Internetseiten der einzelnen Hersteller geladen, verschiedene Hersteller bieten standardmäßig bei der großen Variante der Vergleichsleuchten, im Gegensatz zur konventionellen 140W Leuchte, keine Leuchte mit 3000K an (z.B. Thorn) an bzw. wie die Firma Schreder keine Leuchte in der Leistungsklasse wie die anderen Anbieter. Die Thorn Leuchte entfällt in der Betrachtung, die Produkt von Schreder ist nur hinsichtlich der Effizienz lm/W interessant, wird aber für die weitere Betrachtung auch nicht berücksichtigt. Auf Anfrage wäre es, abhängig von der Stückzahl, bei fast allen Herstellern möglich eine, den Kundenwünschen angepasste Produktkonfiguration zu bestellen. Im Weiteren geht es nur um Standardkatalogprodukte.

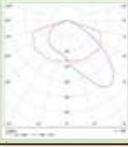

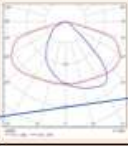
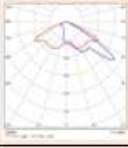
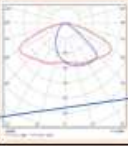
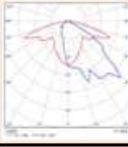

Leuchte	Lichtverteilung	Lampen-leistung [w]	Leuchten-leistung [w]	Lichtstrom LM [lm]	Leuchten-lichtstrom [lm]	Lichtfarbe [K]	Farb-wiedergabe	Wirkungs-grad Leuchte [%]	Lebens-dauer LM [h]	Effizienz LM [lm/w]	Effizienz System [lm/w]
Philips Kofler ³⁸		140	153	17600	14432	3000	>72	82	18000 (5% failure)	126	94
Bega Aufsatzleuchte		152	171	16110	12411	3000	>80	77	50000	106	73
Schreder Ampere Midi		71	79	6436	7572	3000	k.A.	85	k.A.	91	96
Siteco Floodlight 20 mini LED		k.A.	107	k.A.	11050	3000	>70	k.A.	k.A.	-	103
Thorn R2L2		k.A.	117	k.A.	14181	4000	>70	k.A.	100000	-	121
Swarco Futurlux Head 6		k.A.	116	k.A.	10342	3000	>85	k.A.	100000	-	89
Philips Iridium gen3		95	105,56	12095	10644	3000	>70	88	k.A.	127	101

Tabelle 4: Vergleich LED Leuchten | Vergleichswert 140W Cosmopolis^{38 39 40 41 42 43}
³⁸ Vgl. <http://www.aeschreder.at/cms/index.php?id=948>, 24.7.2015

³⁹ Vgl. <http://www.bega.com/de/produkt>, 24.7.2015

⁴⁰ Vgl. <https://www.swarco.com/futurit/Produkte/LED-Beleuchtung>, 24.7.2015

⁴¹ Vgl. http://www.siteco.com/de/at_de/produkte/katalog-aussenleuchten/chapter/1550.html, 24.7.2015

⁴² Vgl. <http://www.ecat.lighting.philips.at/l/aussenleuchten/strassen-und-stadtbeleuchtung/strassen-und-stadtleuchten/72994/cat/>, 24.7.2015

⁴³ Vgl. <http://www.thornlighting.com/en/products/outdoor-lighting/road-lighting>, 24.7.2015



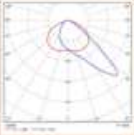
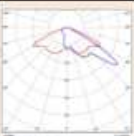



Leuchte	Lichtverteilung	Lampen-leistung [w]	Leuchten-leistung [w]	Lichtstrom LM [lm]	Leuchten-lichtstrom [lm]	Lichtfarbe [K]	Farb-wiedergabe	Wirkungs-grad Leuchte [%]	Lebens-dauer LM [h]	Effizienz LM [lm/w]	Effizienz System [lm/w]
Philips Koffer ⁴		60	67	7200	5904	3000	>73	82	21500 (5% failure)	120	88
Bega Aufsatzleuchte		76	88	8060	6282	3000	>80	78	50000	106	71
Schreder Ampere Mini		55	61	5745	4940,7	3000	k.A.	86	k.A.	104	81
Siteco Floodlight 20 mini LED		k.A.	56	k.A.	5650	3000	>70	k.A.	k.A.	-	101
Thorn R2L2		k.A.	57	k.A.	5818	3000	>70	k.A.	100000	-	102
Swarco Futurlux Head 4		k.A.	72	k.A.	6331	3000	>85	k.A.	100000	-	88
Philips Iridium gen3		56	62	7084	6234	3000	>70	88	k.A.	127	100

Tabelle 5: Vergleich LED Leuchten | Vergleichswert 60W Cosmopolis^{44 45 46 47 48 49}

⁴⁴ Vgl. <http://www.aeschreder.at/cms/index.php?id=948>, 24.7.2015

⁴⁵ Vgl. <http://www.bega.com/de/produkt>, 24.7.2015

⁴⁶ Vgl. <https://www.swarco.com/futurit/Produkte/LED-Beleuchtung>, 24.7.2015

⁴⁷ Vgl. http://www.siteco.com/de/at_de/produkte/katalog-aussenleuchten/chapter/1550.html, 24.7.2015

⁴⁸ Vgl. <http://www.ecat.lighting.philips.at/l/aussenleuchten/strassen-und-stadtbeleuchtung/strassen-und-stadtleuchten/72994/cat/>, 24.7.2015

⁴⁹ Vgl. <http://www.thornlighting.com/en/products/outdoor-lighting/road-lighting>, 24.7.2015

Vergleich Effizienz CPO 140W mit LED System	
Leuchte	Effizienz System [lm/w]
Bega Aufsatzleuchte	73
Schreder Ampera Midi	96
Siteco Floodlight 20 mini LED	103
Thorn R2L2	121
Swarco Futurlux Head 6	89
Philips Iridium gen3	101
Mittelwert LED System	97
konventionelles System	94

Vergleich Effizienz CPO 60W mit LED System	
Leuchte	Effizienz System [lm/w]
Bega Aufsatzleuchte	71
Schreder Ampera Midi	81
Siteco Floodlight 20 mini LED	101
Thorn R2L2	102
Swarco Futurlux Head 6	88
Philips Iridium gen3	100
Mittelwert LED System	94
konventionelles System	88

Tabelle 6: Zusammenfassung der Gegenüberstellung

Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass das moderne konventionelle System mit den LED Systemen durchaus mithalten kann. Bei der Gegenüberstellung der 140W Vergleichssysteme wurde, wie bereits erwähnt, die Thorn Leuchte, wegen der zu hohen Lichtfarbe und der daraus resultierende höheren Lichtausbeute, aus der Bewertung entfernt. Die Bega Leuchte wurde aus beiden Bewertungen genommen, dieser Wert ist für den aktuellen Stand der Technik eindeutig zu niedrig. Alles in allem liegen die Werte der Lichtausbeuten, ausgehend von der Lichtfarbe 3000K, in einem vernünftigen Bereich.

3.5. Gegenüberstellung in der Beleuchtungssimulation

3.5.1. Software zur Simulation

Zur Berechnung wurde die Software DIALux (in der Version 4.12.0.1) eingesetzt, diese ist als Freeware erhältlich. Mit DIALux ist es möglich, Tages- und Kunstlichtplanungen für den Innen- und Außenbereich zu erstellen. Für diese Arbeit wird im Speziellen die Möglichkeit, Straßenbeleuchtungen normgerecht zu planen, genutzt.

Zur Berechnung der verschiedenen Straßenmodelle in DIALux werden von den verschiedenen Herstellern EULUMDAT Dateien im Format *.ldt zur Verfügung gestellt. Diese Daten enthalten alle notwendigen lichttechnischen Informationen und alle Leistungsdaten der Leuchte.

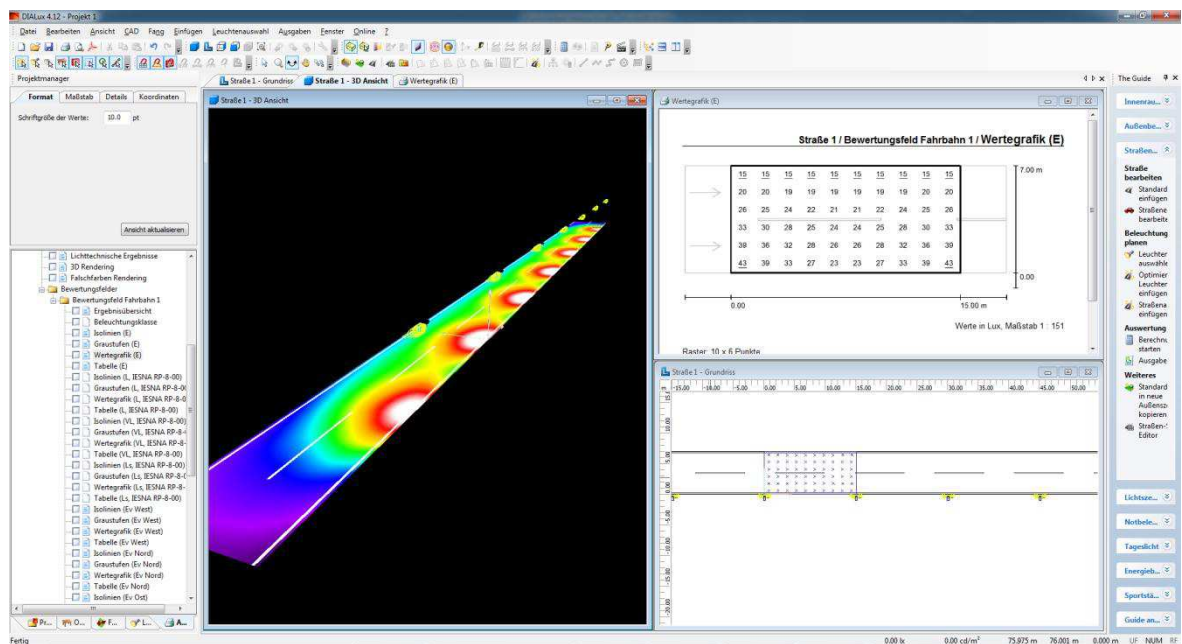


Abbildung 11: DIALux

4. Wirtschaftlicher Vergleich von konventionellen Anlagen mit LED Anlagen

4.1. Kostenvergleich

Es gibt unzählige Varianten, man beachte hier die Klassen der EN 13201, eine Straße zu beleuchten und dazu gibt es sehr viele Möglichkeiten, diese aus wirtschaftlicher Sicht zu beurteilen. Um eine gute Übersicht zu bekommen, wie aktuell meist an Umrüstungsprojekte herangegangen wird und um die Problematik von Wirtschaftlichkeitsberechnungen aufzuzeigen, wird anhand einer Musterstraße einmal Eins-zu-eins Umrüstung der Beleuchtung umgesetzt und dann dazu die normgerechte Neuplanung. Sehr häufig passiert es nämlich aus Kostengründen, dass bestehende Standorte bzw. Leuchtenpositionen übernommen werden, ohne auf aktuelle Vorschriften und Normen einzugehen. Diese Art der Umrüstung ist wirtschaftlich höchst effizient, weil eingesparte Leistung direkt in Geldwerten erfasst werden kann und am Papier tolle Amortisationszeiten möglich sind. Muss aber eine jahrzehntealte Bestandbeleuchtung normgerecht umgesetzt werden, so sind meistens die Lichtpunkthöhen zu niedrig, oder die Lichtpunktabstände zu groß und es müssen neue Fundamente oder Erdstücke gesetzt werden.

Dieser Vergleich in wirtschaftlicher Hinsicht wird in den folgenden Beispielen für die drei Fälle Bestand, Umrüstung des Bestandes mit gleichen Masten und Umrüstung in normgerechter Art und Weise vorgenommen. Eigenschaften wie Lichtfarbe, Farbwiedergabe, usw. spielen in dieser Analyse keine Rolle, müssen aber natürlich in einer normgerechten Planung berücksichtigt werden. Zuerst wird ein reales Beispiel mit einer Kategorisierung in der Klasse S verglichen und im Weiteren eine Berechnung mit einer der ME-Klasse zugeordneten Straße vorgenommen. Für die beiden Beispiele wurden reale Situationen zur Bewertung herangezogen. Für die Berechnung der Ausgangssituation wurde die Bestandsleuchte herangezogen, für den Ein-zu-eins Austausch und die normgerechte Planung wurde eine moderne, passende LED Leuchten Verteilung, welche einen guten Durchschnitt für eine solche Leuchte darstellt, ausgewählt.

4.1.1. Vergleich einer S-Klassen Situation

Als Beispiel wird eine Straße herangezogen, wie man sie im Ortsgebiet oft findet.

Annahmen:

- Geschwindigkeit mit 30 km/h begrenzt
- Nutzer sind alle Verkehrsteilnehmer
- keine geparkten Fahrzeuge am Straßenrand
- Komplexität Sehfeld normal
- Schwierigkeit Navigation normal
- Verkehrsfluss Radfahrer und Fußgänger normal
- Kriminalitätsrisiko normal
- Leuchtdichteniveau der Umgebung ist gering

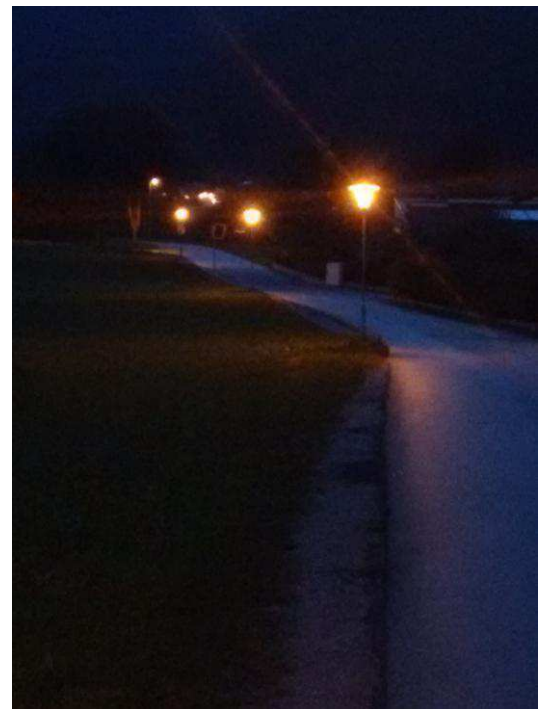


Abbildung 12: Foto Bestandsbeleuchtung S-Klasse (eigene Fotografie)

Diese Parameter führen zu einer notwendigen Straßenbeleuchtung der Klasse S6, das bedeutet, dass im Mittel $\geq 2 \text{ lx}$ und im Minimum $\geq 0.6 \text{ lx}$ erreicht werden

müssen.⁵⁰ In dieser Gegenüberstellung wird der Wartungsfaktor für die Bestandsanlage aufgrund des Leuchtenzustandes mit 0.67 angenommen, wie es für solche Leuchten durchaus üblich ist. Die LED Berechnungen werden eher vorsichtig mit Wartungsfaktor 0.8 gerechnet, wobei viele Hersteller mit einem Faktor von 0.9 für solche Anlagen planen.

4.1.1.1. Variante Bestandsbeleuchtung

Die bestehende Straßenbeleuchtung ist mit Pilzleuchten der Firma Siteco, betrieben mit einem 70W Natriumdampfleuchtmittel, ausgestattet. Wie man auf Abbildung 12 sehr gut erkennen kann, wirft dieser sehr beliebte Leuchtentyp sein Licht, rotationssymmetrisch in alle Richtungen. Man verliert sehr viel Lichtstrom in Bereichen, die eigentlich nicht zu beleuchten sind, wie in diesem Beispiel das freie Feld. Hier kann man bereits mit freiem Auge erkennen, dass das Beleuchtungsstärkeniveau zwischen den Leuchten nahezu auf null abfällt, es ist keine Gleichmäßigkeit in der Beleuchtung zu erkennen, Fußgänger sind in diesen dunklen Bereichen gefährdet. Abgesehen vom Gefahrenpotential für die verschiedenen Verkehrsteilnehmer ist auch der Faktor Lichtverschmutzung nicht zu vernachlässigen. Das Licht wird zwar gerichtet verteilt, oberhalb der horizontalen wird aber trotzdem sehr viel Licht abgegeben und somit viel Streulicht in nicht zu beleuchtende Bereiche abgestrahlt, es kommt zu einer nicht notwendigen Himmelsaufhellung.

⁵⁰ Vgl. ÖNORM EN 13201-2 (2004)

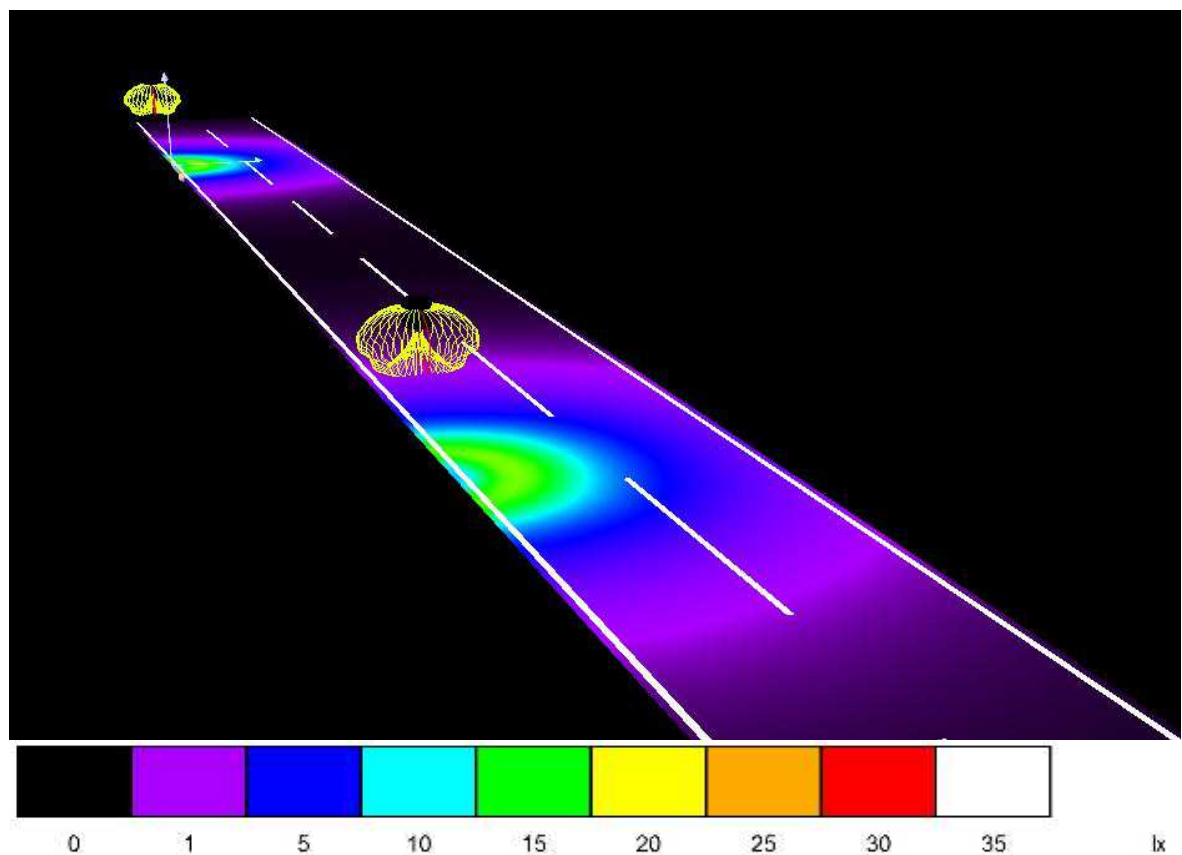
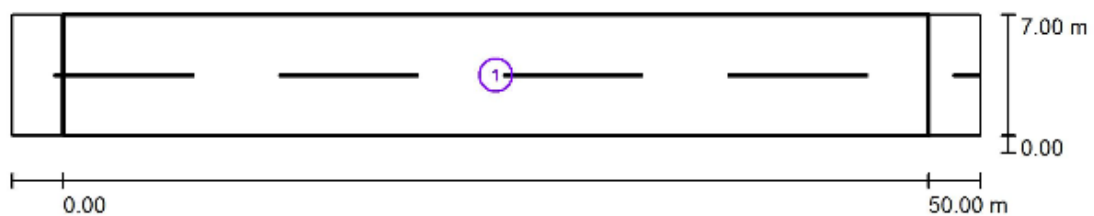


Abbildung 13: Simulation Bestandsbeleuchtung S-Klasse

**Bewertungsfeldliste**

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 50.000 m, Breite: 7.000 m
 Raster: 17 x 5 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse: S6 (Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

Ist-Werte laut Berechnung:
 Soll-Werte laut Klasse:
 Erfüllt/Nicht erfüllt:

E_m [lx]	E_{min} [lx]
1.82	0.09
≥ 2.00	≥ 0.60
✗	✗

Es werden weder Mittelwert noch Minimalwert erreicht.

	jährliche Brenndauer	Leistung Leuchte	Strompreis Kommune	jährliche Energie	Strom- kosten pro Jahr	Leuchten- anzahl	Energie- kosten
Bestand	3000 h	77,8 W	0,11 cent/kWh	233,3 kWh	25,7 €	5	128,3 €

Tabelle 7: laufende Kosten Bestandsleuchte S-Klasse

4.1.1.2. Variante Umrüstung auf selben Masten mit gleichem Lichtstrom

Sehr häufig wird der Einfachheit halber ein Eins-zu-eins Tausch des Altbestands, durch eine neue Leuchte vorgenommen. Das ist die kostengünstigste Variante zu modernisieren, aber eine Anlage, die vorher schon nicht normgerecht war, wird es in den seltensten Fällen durch den Tausch werden. In dieser Berechnung bleiben Abstände und Masthöhen exakt gleich, es wurde eine bestmögliche Abstrahlcharakteristik ausgewählt, um den Vorschriften einigermaßen gerecht zu werden. Der Ersatz in dieser Annahme wird identisch mit dem gleichen Lichtstrom wie bei der konventionellen Variante durchgeführt. Am Ergebnis sieht man sehr gut, dass das viele Licht, welches sonst im Feld verschwunden wäre, jetzt auf der Straße landet und zu einem sehr hohen Mittelwert beiträgt. Dieser Eins-zu-eins Tausch, nur bezogen auf den Lichtstrom, ist auf keinen Fall zulässig und falsch, wird aber durchaus in der Praxis so durchgeführt.

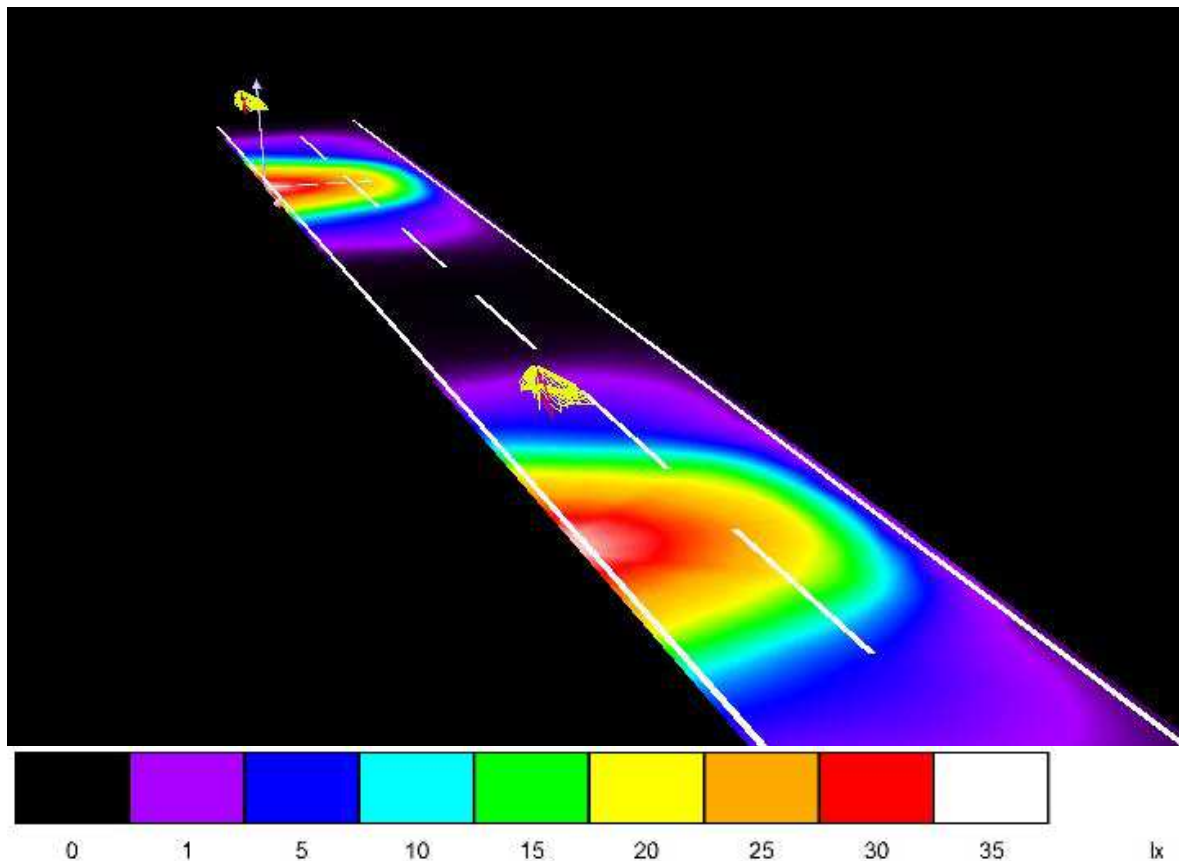
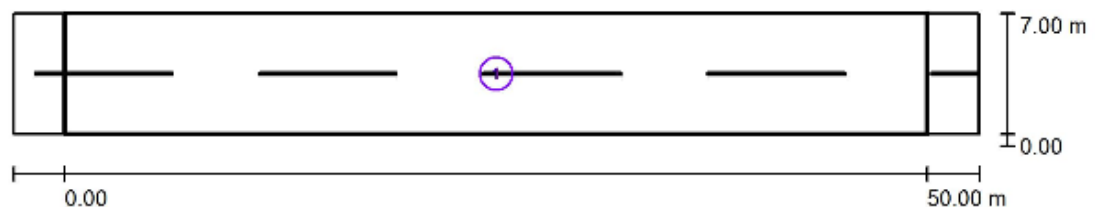


Abbildung 14: Simulation 1:1 Austausch S-Klasse

**Bewertungsfeldliste****1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1**

Länge: 50.000 m, Breite: 7.000 m

Raster: 17 x 5 Punkte

Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.

Ausgewählte Beleuchtungsklasse: S6

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

Ist-Werte laut Berechnung:

Soll-Werte laut Klasse:

Erfüllt/Nicht erfüllt:

 E_m [lx]

5.73

 ≥ 2.00 X¹ E_{min} [lx]

0.02

 ≥ 0.60

X

¹ Achtung: Um eine gewisse Gleichmäßigkeit sicherzustellen, darf der tatsächliche Wert der mittleren Beleuchtungsstärke das 1.5-fache des für die Klasse vorgesehenen Mindestwertes nicht überschreiten.

	jährliche Brenndauer	Leistung Leuchte	Strompreis Kommune	jährliche Energie	Strom- kosten pro Jahr	Leuchten- anzahl	Energie- kosten
1:1 Tausch	3000 h	49,5 W	0,11 cent/kWh	148,5 kWh	16 €	5	81,7 €

Tabelle 8: laufende Kosten 1:1 Austausch S-Klasse

4.1.1.3. Normgerechte Planung

Die einzig zulässige Variante bei einer Neugestaltung der Straßenbeleuchtung ist die fachgerechte Dimensionierung auf Basis einer Lichtplanung. Um die notwendigen Werte auf der Fahrbahn erreichen zu können, wurde der Mastabstand halbiert und die Masthöhe von 4m auf 5m erhöht, mit dieser Maßnahme wird eine bessere Gleichmäßigkeit erreicht, wie man in Abb. 13 sehr gut erkennen kann. Beleuchtungsstärkespitzen entfallen und es kann mit einem Bruchteil des Lichtstroms die Fahrbahn gut ausgeleuchtet werden.

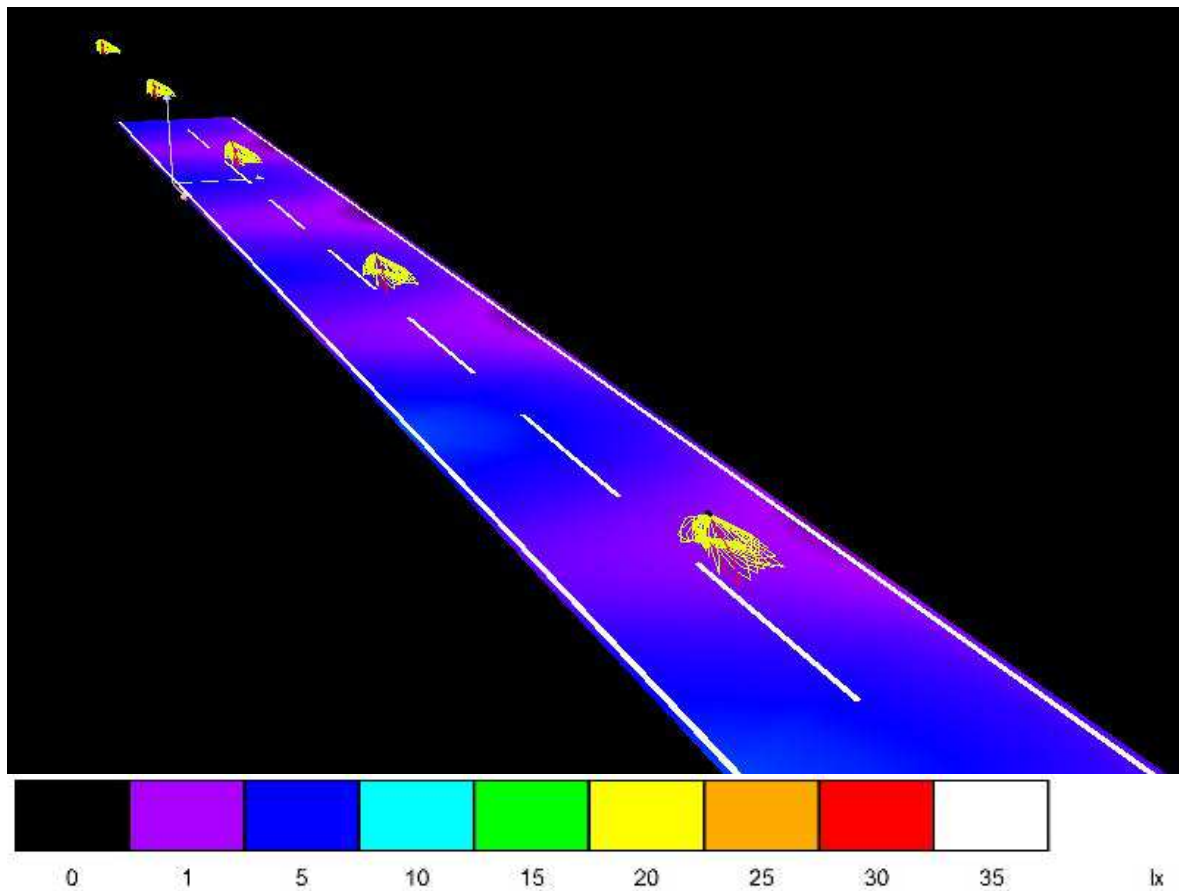
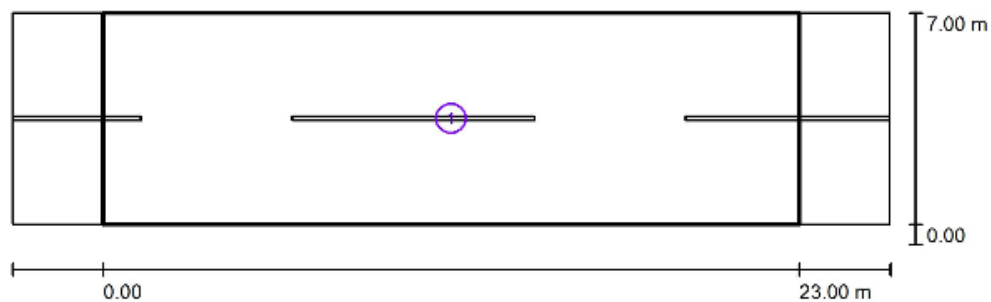


Abbildung 15: normgerechte Planung S-Klasse

**Bewertungsfeldliste**

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 23.000 m, Breite: 7.000 m
 Raster: 10 x 5 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse: S6

(Alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	E_m [lx]	E_{min} [lx]
Ist-Werte laut Berechnung:	2.65	0.73
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 2.00	≥ 0.60
Erfüllt/Nicht erfüllt:	✓	✓

	jährliche Brenndauer	Leistung Leuchte	Strompreis Kommune	jährliche Energie	Strom- kosten pro Jahr	Leuchten- anzahl	Energie- kosten
Normgerecht	3000 h	9,9 W	0,11 cent/kWh	29,7 kWh	3 €	10	32,7 €

Tabelle 9: laufende Kosten normgerechte S-Klasse

4.1.1.4. Gegenüberstellung Anschaffungskosten und laufende Kosten

Für diese Gegenüberstellung wird ein Straßenstück mit 250m angenommen, in Variante 1 und 2 sind das 5 Stück Leuchten, in Variante 3 10 Stück. Der Strompreis ist eine aktuelle Annahme und kann je nach Größe der Gemeinde bzw. Stadt variieren. Die Bestandsanlage, mit 6300lm Lampenlichtstrom wurde bei der Einzu-eins Auswechslung mit 5630lm ersetzt, für eine normgerechte Beleuchtung waren dann aber im dritten Berechnungsmodell nur ca. 1250lm notwendig.

Laufende Kosten

	jährliche Brenndauer	Leistung Leuchte	Strompreis Kommune	jährliche Energie	Strom- kosten pro Jahr	Leuchten- anzahl	Energie- kosten
Bestand	3000 h	77,8 W	0,11 cent/kWh	233,3 kWh	25,7 €	5	128,3 €
1:1 Tausch	3000 h	49,5 W	0,11 cent/kWh	148,5 kWh	16 €	5	81,7 €
Normger.	3000 h	9,9 W	0,11 cent/kWh	29,7 kWh	3 €	10	32,7 €

Tabelle 10: laufende Kosten Beispiel S-Klasse

In diesen laufenden Kosten sind die reinen Energiekosten für ein Jahr berücksichtigt.

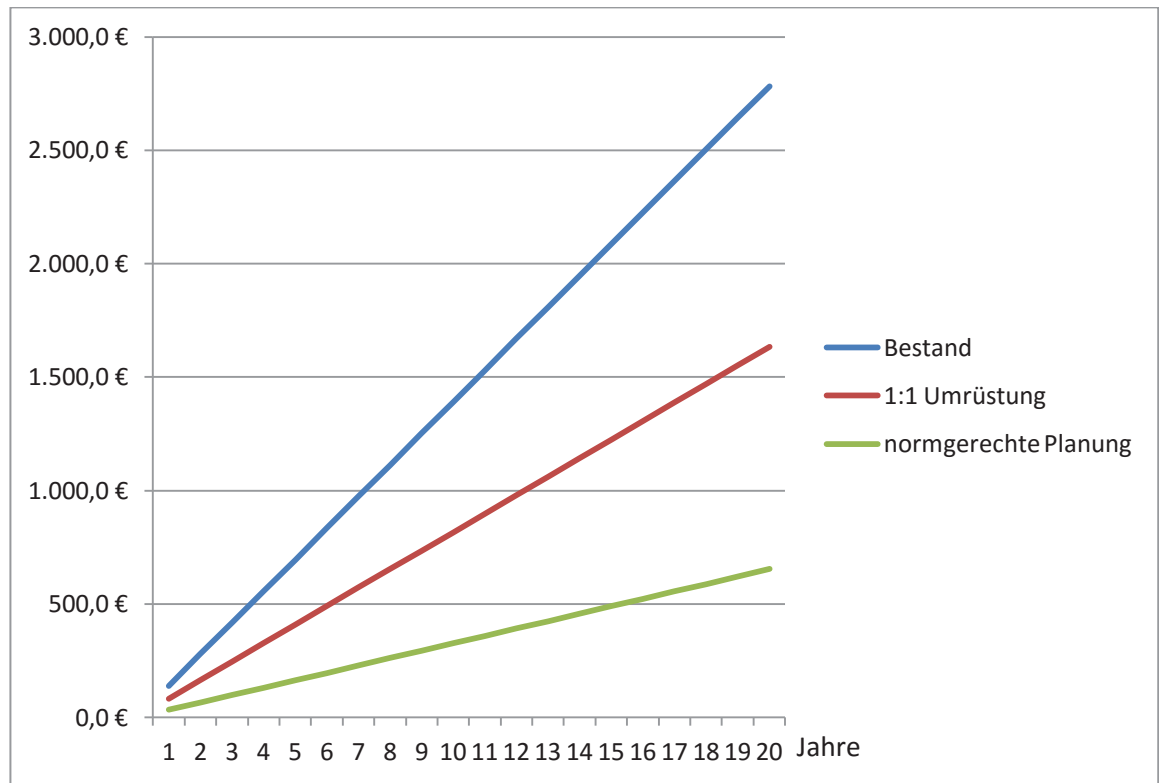


Abbildung 16: Kosten laufender Betrieb

Anschaffungskosten

	Preis Einzelleuchte [€]	Gesamtpreis Leuchten [€]	Einzelpreis Mast [€]	Gesamtpreis Mast[€]	Gesamt- anschaffung [€]
Bestand	0	0	0	0	0
1:1 Tausch	500	2500	0	0	2500
normgerecht	300	3000	400	4000	7000

Tabelle 11: Anschaffung Beispiel S-Klasse

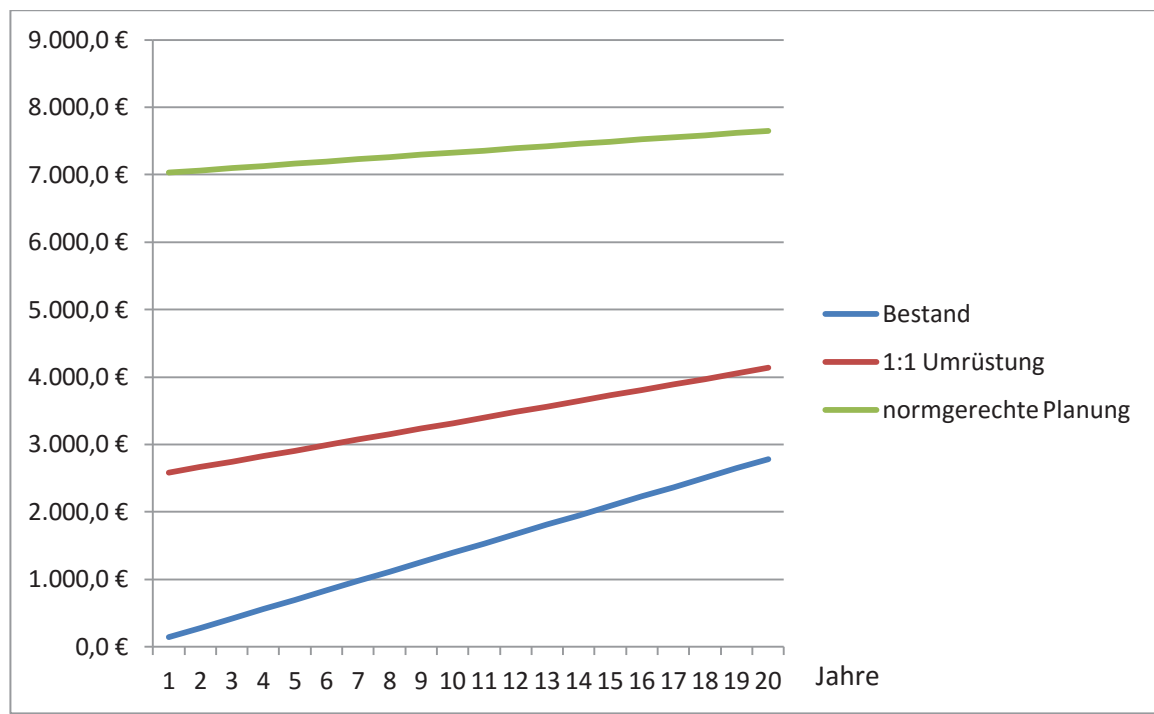


Abbildung 17: Kosten laufender Betrieb mit Investition Beispiel S-Klasse

Kosten für Leuchtmitteltausch

Dauer **20 y**

	Brenndauer	Lebensdauer	Tausch LM	Wechselzeit	Stunden-satz	Kosten LM	Gesamt kosten
Bestand	60000 h	25000 h	2,4	1,0 h	80,0 €	10,0 €	216 €
1:1 Tausch	60000 h	>60000 h	0	-	-	-	-
Norm-gerecht	60000 h	>60000 h	0	-	-	-	-

Tabelle 12: Leuchtmittelwechsel Beispiel S-Klasse

Wie man in Abb. 16 gut erkennen kann, verursacht die normgerecht geplante Beleuchtung die geringsten Kosten für die Energie. Mit der Einsparung kann man die Investitionskosten in diesem Beispiel aber nicht hereinholen.

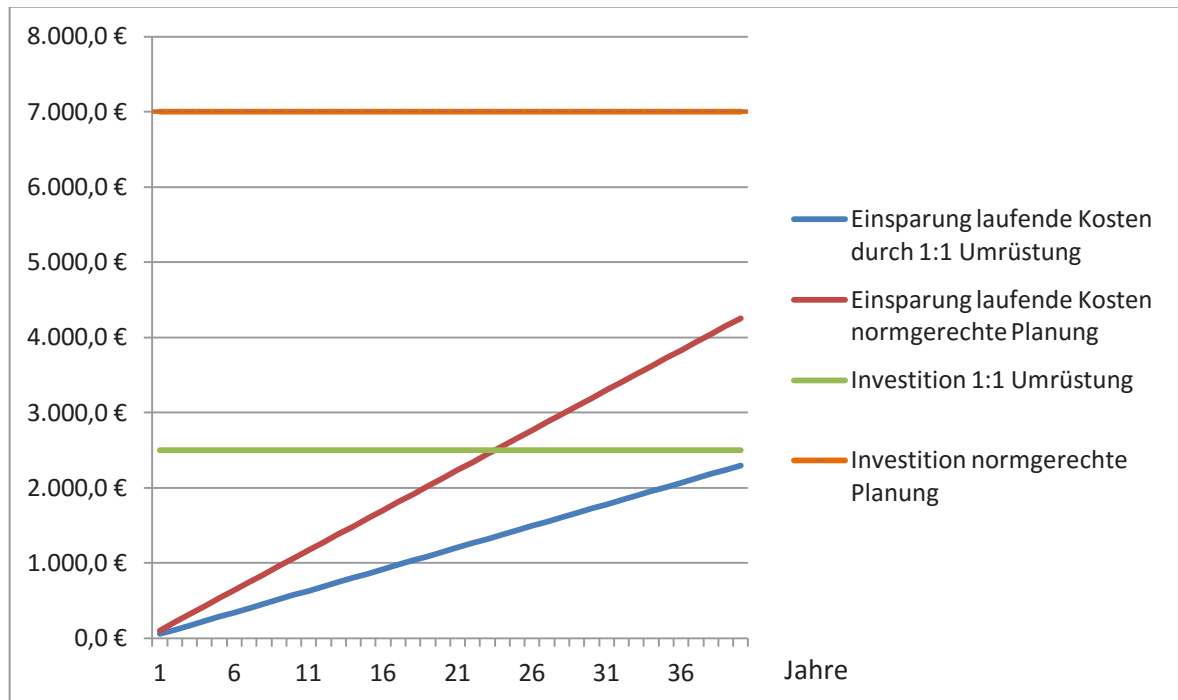


Abbildung 18: Anschaffung im Vergleich zur Einsparung Beispiel S-Klasse

4.1.2. Vergleich einer ME-Klassen Situation

Als Beispiel wird eine Straße herangezogen, wie man sie im Ortsgebiet oft findet.

Annahmen:

- Geschwindigkeit mit 50 km/h begrenzt
- Nutzer sind alle Verkehrsteilnehmer
- keine geparkten Fahrzeuge am Straßenrand
- Komplexität Sehfeld normal
- <3 Stk. Einfache Kreuzungen pro km
- Schwierigkeit Navigation normal
- weniger als 7000 Fahrzeuge pro Tag
- Leuchtdichteniveau der Umgebung ist gering
- normaler Verkehrsfluss von Radfahrern



Abbildung 19: Foto Bestandsbeleuchtung ME-Klasse (eigene Fotografie)

Diese Parameter ergeben laut EN13201 eine notwendige Straßenbeleuchtung der Klasse ME6, das bedeutet, dass im Mittel $\geq 0,30 \text{ cd/m}^2$, ein U_0 von $\geq 0,35$, ein U_1 von $\geq 0,40$ und ein $TI \leq 15\%$ erreicht werden müssen.⁵¹ Der Gehsteig spielt hier eine untergeordnete Rolle, wird aber mit der Klasse S6 festgelegt. In dieser Gegenüberstellung wird der Wartungsfaktor für die Bestandsanlage mit 0.67 angenommen, wie es für solche Leuchten durchaus üblich ist. Die LED Berechnungen werden eher vorsichtig mit Wartungsfaktor 0.8 gerechnet.

In der Betrachtung der ME-Klassen kommt jetzt der Faktor Fahrbahnbelag hinzu. Der Belag lässt sich im Nachhinein schwer einteilen, für die folgenden Simulationen wird für die Fahrbahn ein Belag R3 mit einem q_0 von 0.07 angenommen.

Die Falschfarbenabbildungen werden hier, obwohl die Leuchtdichte bei dieser Klassifizierung das Hauptbewertungskriterium darstellt, in Lux angegeben. Diese Software bietet nicht die Möglichkeit Leuchtdichtedarstellungen in Falschfarben

⁵¹ Vgl. ÖNORM EN 13201-2 (2004)

aus Beobachtersicht zu zeigen. Die Bilder geben aber trotzdem ein Gefühl für die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung.

4.1.2.1. Variante *Bestandsbeleuchtung*

Die bestehende Straßenbeleuchtung besteht, wie im S-Klassen Beispiel, aus Pilzleuchten der Firma Siteco, betrieben mit einem 70W Natriumdampfleuchtmittel. In Abbildung 18 erkennt man auch hier die schlechte Verteilung der Beleuchtung auf der Fahrbahn. Es wird sehr viel Licht in Richtung Feld verschwendet und die Straße nicht ausreichend ausgeleuchtet. Mit freiem Auge kann man erkennen, dass das Beleuchtungsstärkeniveau zwischen den Leuchten nahezu auf null abfällt, es ist keine Gleichmäßigkeit in der Beleuchtung zu erkennen. Bei der Bewertung dieser Situation kommen Leuchtdichten, anstatt der Beleuchtungsstärkewerte, zum Einsatz.

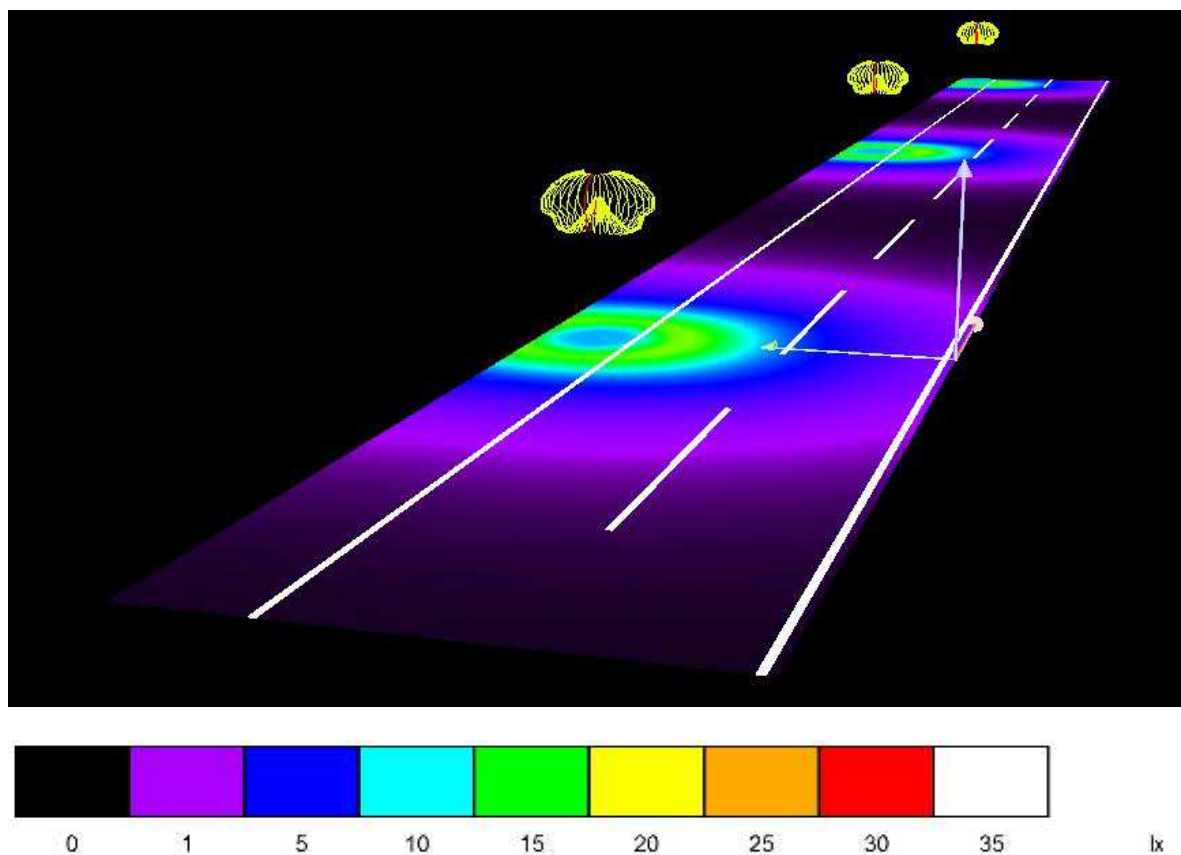
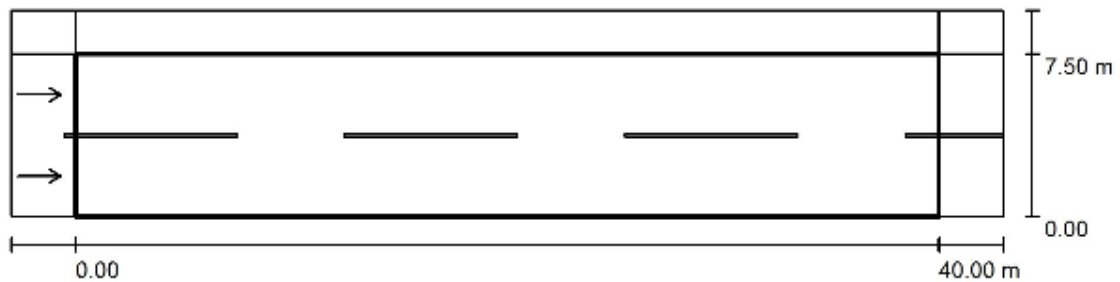


Abbildung 20: Simulation Bestandsbeleuchtung ME-Klasse



Wartungsfaktor: 0.67

Raster: 14 x 6 Punkte

Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.

Belag: R3, q_0 : 0.070

Ausgewählte Beleuchtungsklasse: ME6

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	L_m [cd/m ²]	U0	UI	TI [%]
Ist-Werte laut Berechnung:	0.12	0.11	0.10	69
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 0.30	≥ 0.35	≥ 0.40	≤ 15
Erfüllt/Nicht erfüllt:	X	X	X	X

	jährliche Brenndauer	Leistung Leuchte	Strompreis Kommune	jährliche Energie	Strom- kosten pro Jahr	Leuchten- anzahl	Energie- kosten
Bestand	3000 h	77,8 W	0,11 cent/kWh	233,3 kWh	25,7 €	6,25	160,4 €

Tabelle 13: laufende Kosten Bestandsleuchte ME-Klasse

4.1.2.2. Variante Umrüstung auf selben Masten mit gleichem Lichtstrom

Wie im Kapitel mit der S-Klassenbewertung, wird auch hier ein Eins-zu-eins Tausch des Leuchtenkopfes mit gleichem Lichtstrom vorgenommen. Die Problematik mit der normgerechten Beleuchtung bleibt auch hier bestehen, 50m Lichtpunktabstand bei 4m Masthöhe sind für eine korrekte Beleuchtung im ME Bereich nicht geeignet. Der Mittelwert ist zwar erreicht, die Gleichmäßigkeiten entsprechen aber nicht den vorgeschriebenen Werten, die Blendung ist mit 42% weit über dem erlaubten Grenzwert.

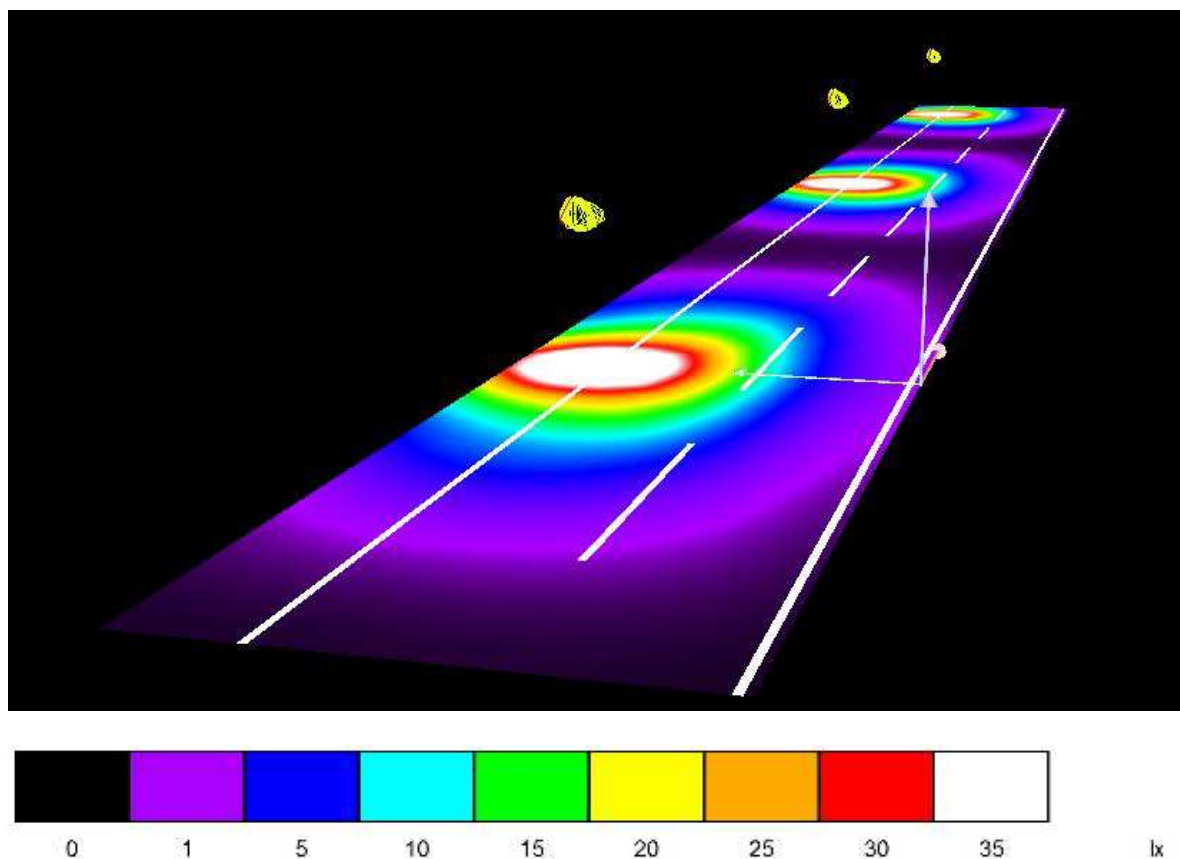
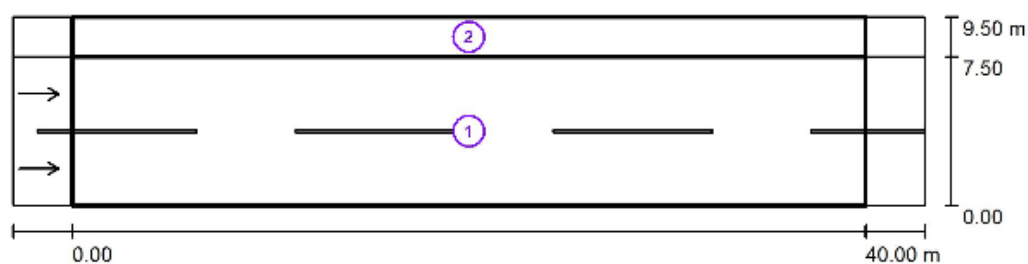


Abbildung 21: Simulation 1:1 Tausch ME-Klasse



Wartungsfaktor: 0.67

Bewertungsfeldliste

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 40.000 m, Breite: 7.500 m
 Raster: 14 x 6 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Belag: R3, q0: 0.070
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse:
 ME6

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

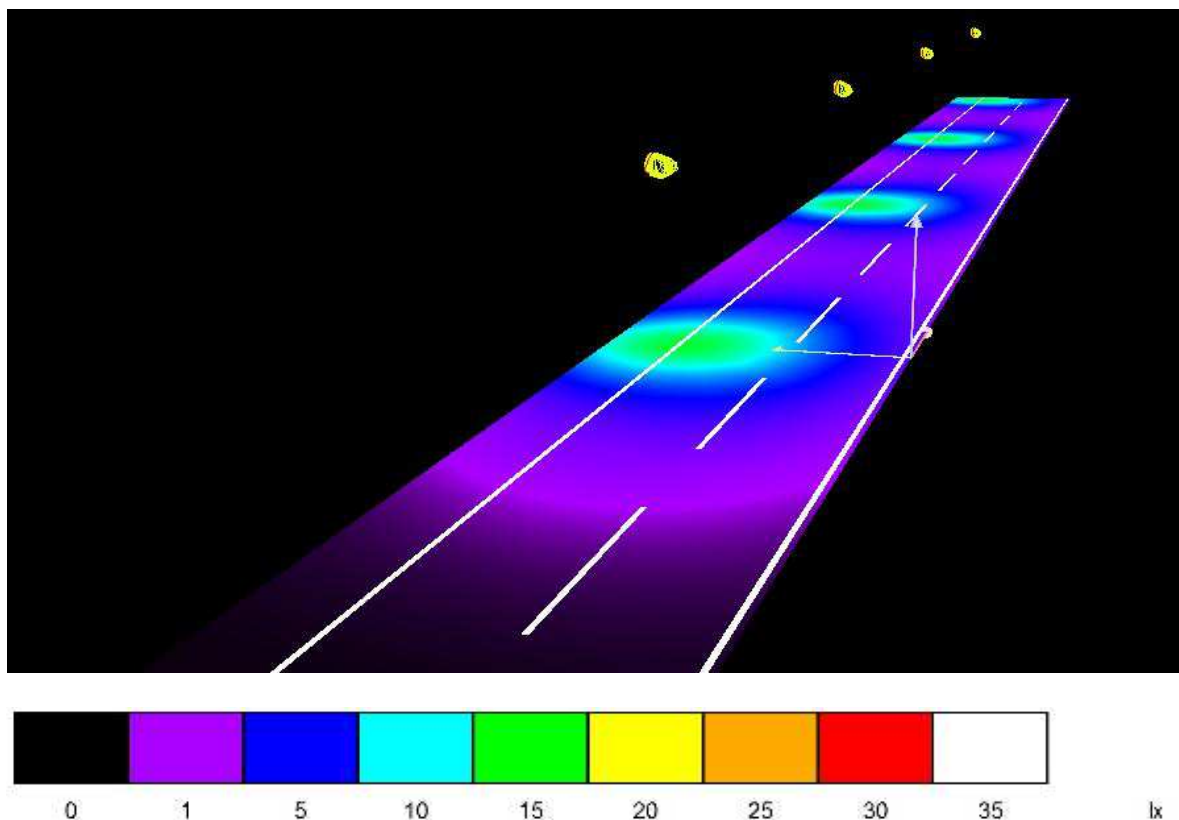
	L_m [cd/m²]	U0	UI	TI [%]
Ist-Werte laut Berechnung:	0.33	0.06	0.07	42
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 0.30	≥ 0.35	≥ 0.40	≤ 15
Erfüllt/Nicht erfüllt:	✓	✗	✗	✗

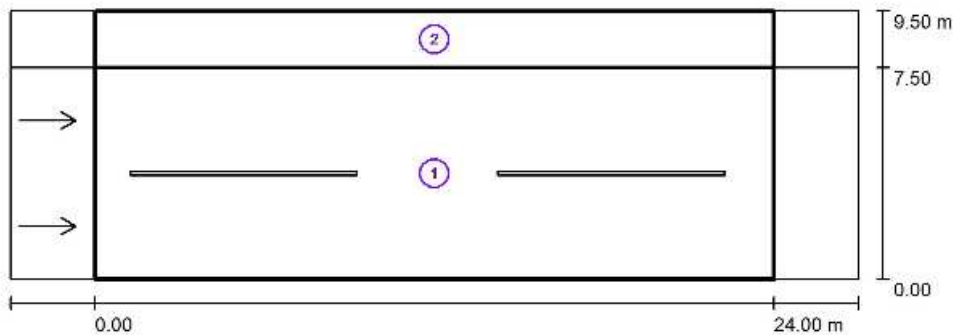
	jährliche Brenndauer	Leistung Leuchte	Strompreis Kommune	jährliche Energie	Strom- kosten pro Jahr	Leuchten- anzahl	Energie- kosten
1:1 Tausch	3000 h	49,5 W	0,11 cent/kWh	148,5 kWh	16 €	6,25	102,1 €

Tabelle 14: laufende Kosten 1:1 Austausch ME-Klasse

4.1.2.3. Normgerechte Planung

Eine normgerechte Gestaltung der Straßenbeleuchtung kann auch hier nur über eine Anpassung des Lichtpunktabstands und der Masthöhe erfolgen. Die Masthöhe wurde von 4m auf 6m erhöht, was bei diesem Straßentyp durchaus machbar ist und hier auch ins Ortsbild passen würde. Der Leuchtenabstand wurde von 50m auf 24m verringert. Am Falschfarbenbild kann man erkennen, dass das Licht nun viel gleichmäßiger verteilt wird, es gibt keine extremen Spitzen mehr direkt unter der Leuchte und die geforderten Werte werden erreicht.


Abbildung 22: Simulation normgerechte Beleuchtung ME-Klasse



Wartungsfaktor: 0.67

Bewertungsfeldliste

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 24.000 m, Breite: 7.500 m
 Raster: 10 x 6 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Belag: R3, q_0 : 0.080
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse: ME6 (Alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)
- | | L_m [cd/m ²] | U_0 | U_I | TI [%] |
|----------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-----------|
| Ist-Werte laut Berechnung: | 0.42 | 0.36 | 0.83 | 15 |
| Soll-Werte laut Klasse: | ≥ 0.30 | ≥ 0.35 | ≥ 0.40 | ≤ 15 |
| Erfüllt/Nicht erfüllt: | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

	jährliche Brenndauer	Leistung Leuchte	Strompreis Kommune	jährliche Energie	Strom- kosten pro Jahr	Leuchten- anzahl	Energie- kosten
Normgerecht	3000 h	33,0 W	0,11 cent/kWh	99,0 kWh	11 €	10,4	113,3 €

Tabelle 15: laufende Kosten normgerechte ME-Klasse

4.1.2.4. Gegenüberstellung Anschaffungskosten, laufende Kosten

Für diese Gegenüberstellung wird ebenfalls ein Straßenstück mit 250m angenommen, in Variante 1 und 2 sind das bei 24m Abstand 6,25 Stück Leuchten, in Variante 3 10,4 Stück. Der Strompreis wird wie im Beispiel vorher angenommen. Die Bestandsanlage, mit 6300lm Lampenlichtstrom wurde bei der Ein-zu-eins Auswechslung mit 5630lm ersetzt, für eine normgerechte Beleuchtung waren dann aber im dritten Berechnungsmodell ca. 3750lm notwendig.

	jährliche Brenn- dauer	Leistung Leuchte	Strompreis Kommune	jährliche Energie	Strom- kosten pro Jahr	Leuchten anzahl	Energie- kosten
Bestand	3000 h	77,8 W	cent/ kWh 0,11	233,3 kWh	25,7 €	6,25	160,4 €
1:1 Tausch	3000 h	49,5 W	cent/ kWh 0,11	148,5 kWh	16 €	6,25	102,1 €
Normgerecht	3000 h	33,0 W	cent/ kWh 0,11	99,0 kWh	11 €	10,4	113,3 €

Tabelle 16: laufende Kosten Beispiel ME-Klasse

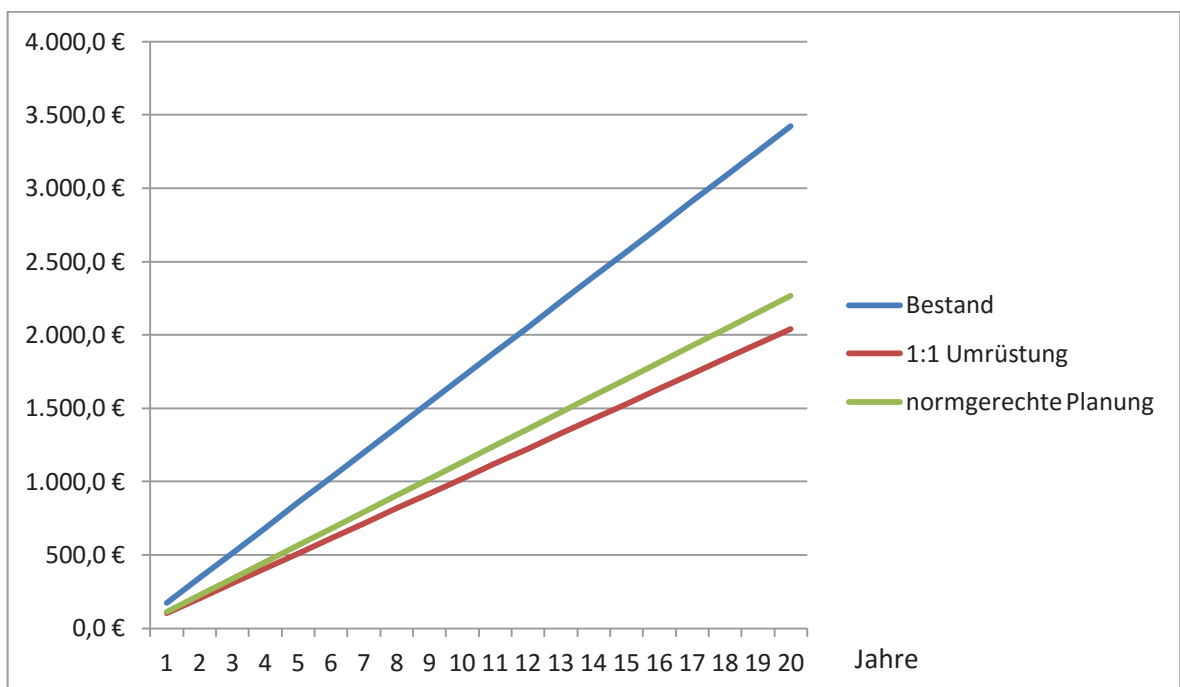


Abbildung 23: Kosten laufender Betrieb Beispiel ME Klasse

Anschaffungskosten

	Preis Einzelleuchte [€]	Gesamtpreis Leuchten [€]	Einzelpreis Mast [€]	Gesamtpreis Mast[€]	Gesamt- anschaffung [€]
Bestand	0	0	0	0	0
1:1 Tausch	500	3125	0	0	3125
normgerecht	400	4160	500	5200	9360

Tabelle 17: Anschaffung Beispiel ME-Klasse

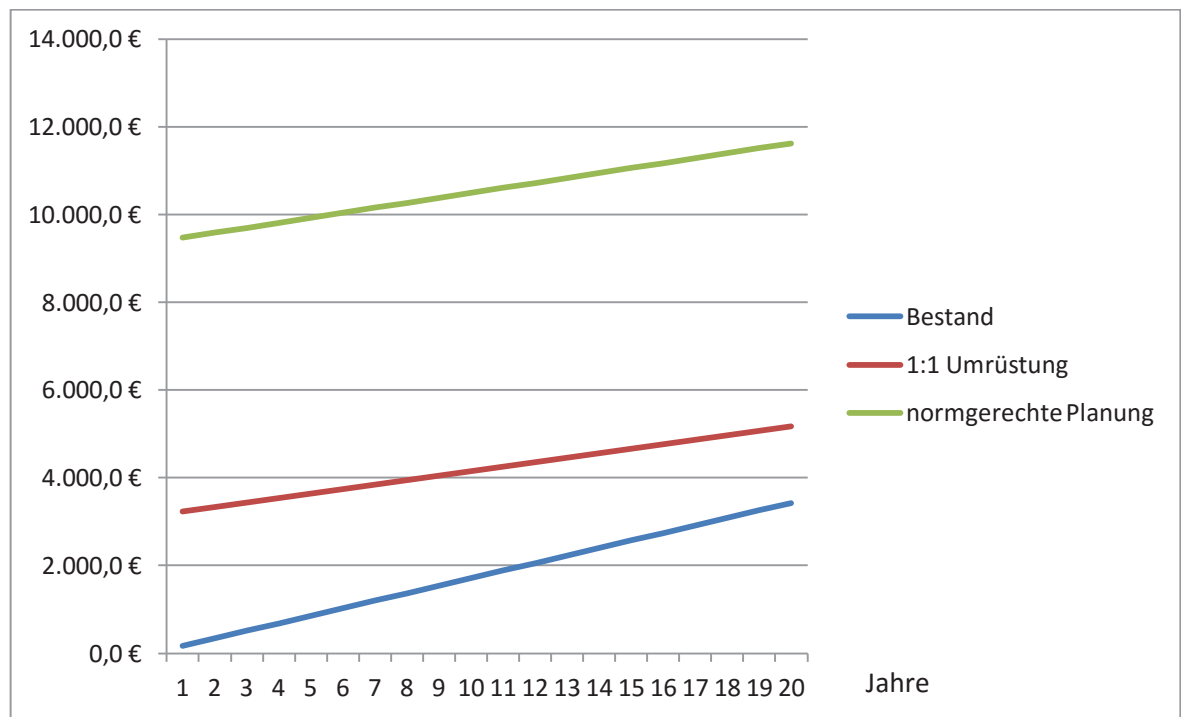


Abbildung 24: Kosten laufender Betrieb mit Investition Beispiel ME-Klasse

Kosten für Leuchtmitteltausch

Dauer 20 y

	Brenn dauer	Lebens dauer	Tausch LM	Wechsel zeit	Stunden satz	Kosten LM	Gesamt kosten
Bestand	60000 h	25000 h	2, 4	1,0 h	80,0 €	10,0 €	216 €
1:1 Tausch	60000 h	>60000 h	0	-	-	-	-
normgerecht	60000 h	>60000 h	0	-	-	-	-

Tabelle 18: Leuchtmittelwechsel Beispiel ME-Klasse

Auch bei diesem ME Klassen Beispiel zeigt sich das Problem mit der Investition, die neue Beleuchtungsanlage kann sich über die Einsparung nicht amortisieren.

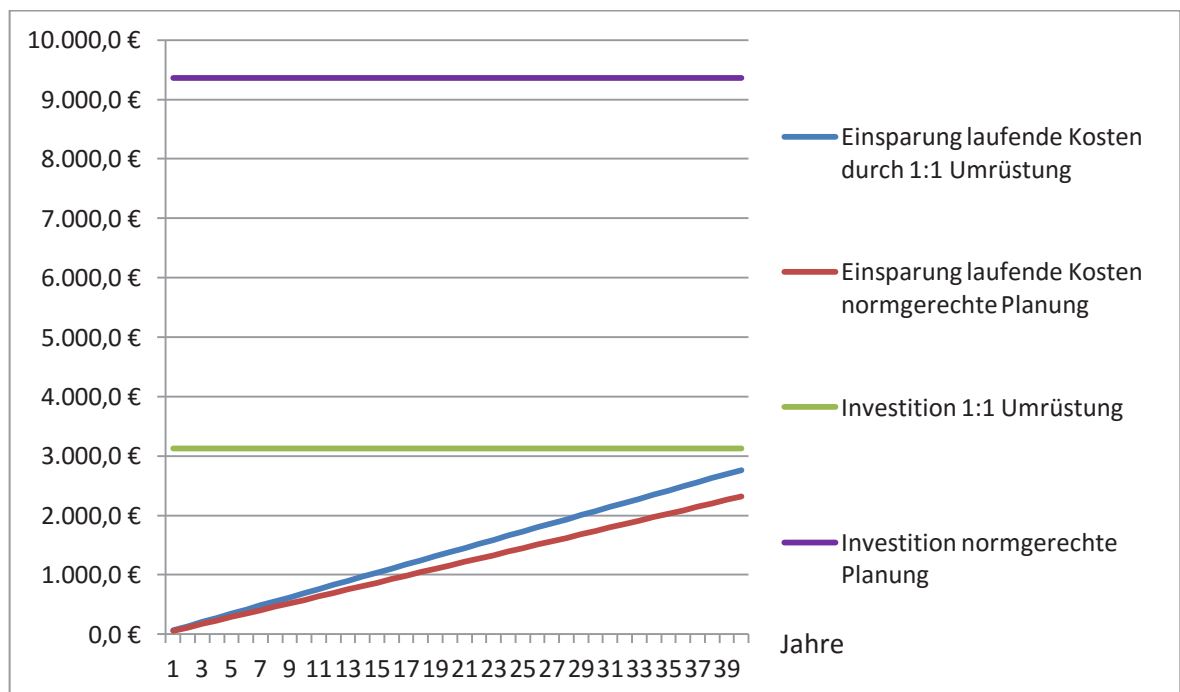


Abbildung 25: Anschaffung im Vergleich zur Einsparung Beispiel ME-Klasse

Bei einem 1:1 Ersatz ist die Einsparung der laufenden Kosten sehr hoch, die Investition in die neuen Leuchten ist aber auf den Zeitraum von 20 Jahren betrachtet ebenfalls nicht durch die Stromersparnis wieder hereinzuholen. Noch schlechter funktioniert das bei der normgerechten Beleuchtung, für die noch mehr Geld investiert werden muss. Zum reinen Leuchten und Mastpreis kommen noch Grabungs- und Verlegearbeiten, welche hier aber nicht berücksichtigt wurden, um einen reinen Vergleich, bezogen auf das Beleuchtungssystem, zu ermöglichen. Man kann davon ausgehen, dass eine so umfassende Adaptierung der Beleuchtungsanlage im Zuge einer Straßenrenovierung erfolgt.

In der Praxis findet man oft Anlagen, deren Umrüstung auf LED gefördert wird und somit geringere Investitionskosten verursachen. Für solche Förderungen muss eine Einsparung nachgewiesen werden und so werden zur Bewertung oft IST-Werte anstatt der vorgeschriebenen Normwerte eingereicht. Oft reicht diese Angabe um die Förderungen genehmigt zu bekommen. Die scheinbare Einsparung von laufenden Energiekosten ist vorhanden, aber in Kombination mit den normativ unzulässigen Werten ist diese Umrüstung mehr als kritisch zu sehen. Wie man in diesem Beispiel sieht, gibt es hier bei einer normgerechten Umsetzung keine großen Einsparungen bei den laufenden Energiekosten. Ist das Bestandsleuchtmittel z.B. eine Quecksilberdampf Lampe mit sehr schlechtem Wirkungsgrad, dann liegt die Stromeinsparung in einem besseren Bereich. Da die Quecksilberdampf Lampe ohnehin verboten wurde und theoretisch keine Leuchtmittel mehr im Handel erhältlich sind, ist der Vergleich mit dieser Lampe nicht mehr sinnvoll und mittelfristig eine Umrüstung unumgänglich.⁵²

4.2. Nutzwertanalyse

4.2.1. Datengrundlage

Als Grundlage der Nutzwertanalyse wurde eine Expertenbefragung vorgenommen, in welcher von mehreren Personen, in für Straßenbeleuchtungsthemen verantwortlichen Positionen, elf Fragen jeweils im Vergleich

⁵² Vgl. Verordnung (EU) Nr. 1194/2012

von konventionellem System und LED System beantwortet wurden. Es wurden die subjektiven Empfindungen von Entscheidern und Planern, in den Bereichen Preisniveau, Qualität, Wiederbeschaffung, Wartung, Zuverlässigkeit, Effizienz, Montage, usw. abgefragt, ergänzt durch eine Gewichtung der einzelnen Entscheidungen.

4.2.2. Umfrage

Die Umfrage wurde online mit dem Tool „Google Forms“⁵³ erstellt und nach einem persönlichen Gespräch an den Teilnehmer verschickt und von diesem selbst beantwortet, oder telefonisch abgefragt und parallel ausgefüllt. Die Umfrage wurde ausschließlich mit Experten durchgeführt, welche über das notwendige Fachwissen aus Ihrem beruflichen Alltag verfügen.⁵⁴ Bei der Anfrage wurde darauf geachtet dass jeder Teilnehmer informiert wurde, was das Ziel dieser Umfrage ist, warum er als ideal für die Teilnahme an der Befragung angesehen wird und wie der zeitliche Rahmen bzw. Umfang aussieht. Abgesehen davon wurde den Teilnehmern erklärt, dass ihr Name auf Wunsch verborgen bleibt und wie ihre Daten weiterverwendet werden.⁵⁵ Damit sollte eine hohe Rücklaufquote und eine qualitativ gute und wertvolle Grundlage für eine spätere Nutzwertanalyse erzielt werden. Da es in diesem Teil der Arbeit um eine subjektive Erfassung von Erfahrungen zu verschiedenen Kriterien geht, wird eine Ordinalskala zur Bewertung eingesetzt.

⁵³ Vgl. Google Formulare, https://www.google.com/intl/de_at/forms/about/ , 5.9.2015

⁵⁴ Vgl. R. Kaiser (2014), S.36

⁵⁵ Vgl. R. Kaiser (2014), S.78

Aufbau der Umfrage mit Einleitung inklusive kurzer Erklärung, für die Teilnehmer denen die Umfrage per Email geschickt wurde, und einer abschließenden Frage zum persönlichen Arbeitsbereich:

Umfrage LED vs. konventionelle Straßenleuchte

Diese Umfrage ist Teil einer Abschlußarbeit für den Zweig Wirtschaftsingenieurwesen an der Hochschule Mittweida.

In der Arbeit geht es um die Fragestellung (auch wenn der Weg Richtung LED bereits eingeschlagen wurde) ob der Wechsel auf LED Technik in wirtschaftlicher und technischer Hinsicht sinnvoll ist bzw. war und ob eine Weiterentwicklung von konventionellen Leuchtmitteln sinnvoll hätte sein können.

Es geht in diesem Teil der Arbeit um das subjektive Empfinden von Kunden und Entscheidern!

Bewerten Sie eine durchschnittliche Leuchte in LED und eine bewährte in moderner konventioneller Technik mit hoher Effizienz (z.B. Philips CosmoPolis).

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Kontakt für Fragen oder Anregungen mkindl@hs-mittweida.de

Frage 1/12

Wie empfinden Sie das Preisniveau von Straßenleuchten?*

	sehr hoch	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

	unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 2/12

Wie empfinden Sie allgemein die Qualität von Straßenleuchten v.a. hinsichtlich Oberflächen, Materialien, Elektronik?*

	sehr hoch	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

	unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 3/12

Wie bewerten Sie die Wiederbeschaffungsmöglichkeiten von Ersatzteilen für Straßenleuchten?*

	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 4/12

Wie bewerten Sie die Wartungsfreundlichkeit von Straßenleuchten?*

	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 5/12

Wie bewerten Sie die Zuverlässigkeit von Straßenleuchten?*

	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 6/12

Die Leuchte repräsentiert den Stand der Technik?*

	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 7/12

Wie schätzen Sie den Stromverbrauch einer normgerecht geplanten Anlage ein?*

	sehr hoch	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 8/12

Wie beurteilen Sie die Montagefreundlichkeit Ihrer eingesetzten Straßenleuchten?*

	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 9/12

Wie beurteilen Sie die Robustheit Ihrer eingesetzten Straßenleuchten (z.B. Vandalismus, Schäden durch Verkehrsteilnehmer,...)?*

	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 10/12

Wie bewerten Sie die Wetter- und Klimabeständigkeit von Straßenleuchten (z.B. Kondenswasser, Dichtheit,...)?*

	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 11/12

Wie beurteilen Sie den Sehkomfort bzw. das Blendverhalten Ihrer eingesetzten Straßenleuchten?*

	sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
LED Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
konventionelle Beleuchtung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Wie wichtig ist Ihnen dieser Punkt?*

unwichtig - 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - sehr wichtig
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frage 12/12

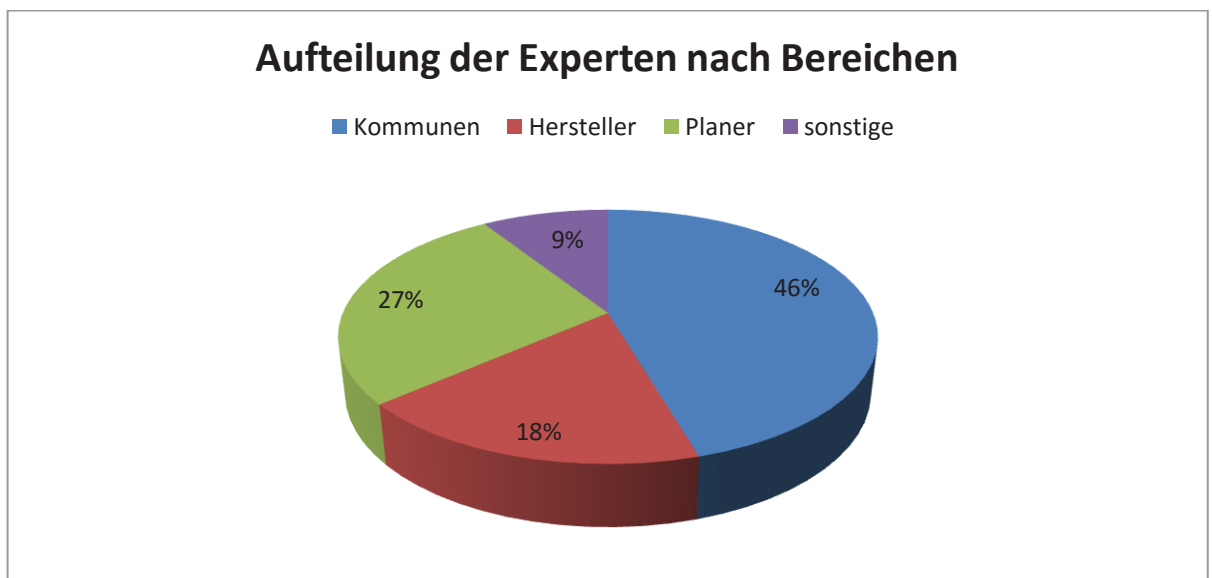
Für wen bzw. in welchem Bereich arbeiten Sie?*

Name Unternehmen

Position

E-Mail Adresse (optional)

Es konnten 11 Befragungen mit Personen aus den unterschiedlichsten Bereichen durchgeführt werden, welche sich wie folgt aufteilen:

**Abbildung 26: Expertenaufteilung****4.2.3. Kriterien**

Die Bewertungen und Wichtungen basieren auf der durchgeführten Umfrage.

Zur Analyse werden die bewerteten Kriterien in Werte von 0 - 10 transformiert, da diese, abgesehen vom Preis, nicht in messbaren Größen bewertet werden können, 10 ist der höchste, 0 der geringste Wert.

Preisniveau

Der Preis ist einer der wichtigsten Entscheidungskriterien, aber auch einer der am Schwierigsten zu definierenden, für diese Gegenüberstellung. So können die Preise sehr stark von Projekt zu Projekt variieren, die große Frage ist auch, wo man die Leuchte bezieht. Am Ende ist es auch sehr stark davon abhängig von welchem Hersteller und in welcher Menge man die Produkte zukaufft.

Aufgrund dieser Tatsache wird auf die Bewertung von tatsächlichen Preisen verzichtet und nur über den Vergleich der Systeme ein gefühlter Preis ermittelt.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Preisniveau:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	4,36	5,82	0,74

Die Bewertung der Preissituation ist nicht überraschend, die neue, aufwändigere LED Technik ist in der Anschaffung preislich höher einzuordnen als die konventionelle Beleuchtungstechnik.

Qualität

Die Qualität von bekannten Herstellern von klassischer Straßenbeleuchtung ist am Markt bekannt und kann vom Kunden relativ gut eingeschätzt werden. No-Name-Produkte kommen bei großen Betreibern und Kommunen eher selten zum Einsatz. Qualitätsmerkmale sind unter Anderem wertige Oberflächen, gute Materialauswahl, eine durchdachte Konstruktion und gutes funktionales Design. Gerade bei der LED Beleuchtung ist die Auswahl der elektronischen Komponenten von großer Wichtigkeit und hat mehr Einfluss auf die Haltbarkeit des Gesamtsystems, im Vergleich zur konventionellen Beleuchtung, die aus elektrotechnischer und thermischer Sicht unempfindlicher ist.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Qualität:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	8,00	7,27	0,79

Die Bewertung der qualitativen Situation fällt sehr ausgeglichen aus, mit leichten Vorteilen der LED Variante.

Wiederbeschaffungsmöglichkeit

Aktuell herrscht bei den alten und neuen Systemen eine große Unsicherheit, was die Wiederbeschaffung von Teilen der Beleuchtungsanlage angeht. Zum Einen wird kaum mehr Energie in die Weiterentwicklung von klassischen Leuchtmitteln gesteckt, teilweise werden sogar ganze Produktlinien eingestellt. Die LED Technik hingegen entwickelt sich sehr schnell weiter und lässt viele Kunden daran zweifeln, ob die Leuchte die man heute kauft in fünf oder zehn Jahren überhaupt noch in der Konfiguration zu bekommen ist.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Wiederbeschaffung:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	5,82	8,55	0,74

Man sieht am Ergebnis dieser Frage sehr deutlich, dass das Vertrauen in die herkömmliche, und im Verhältnis oft technisch einfachere Lösung, gegenüber der alten Technik und deren Möglichkeiten zur Wiederbeschaffung von Ersatzteilen größer ist, als bei den neuen, sich ständig weiter entwickelnden Produkten.

Wartungsfreundlichkeit

Wird bei einer klassischen Straßenleuchte das Leuchtmittel, in diesem Fall ein CPO Leuchtmittel, kaputt, so kann die Leuchte im Idealfall einfach geöffnet werden und die alte Lampe gegen eine Neue getauscht werden. Ebenso lassen sich Netzteile verhältnismäßig einfach tauschen, sollten diese das Ende der Lebensdauer erreichen.

Bei LED Leuchten wird, trotz Angaben von Lebensdauern bis zu 100000h, immer mehr zu Modulkonzepten übergegangen, die einen Leuchtmitteltausch theoretisch möglich machen. Theoretisch deshalb, weil die Entwicklung der LED noch lange nicht am Ende ist und es für Leuchtenlieferanten schwierig ist, in 5-10 Jahren immer noch die selbe LED in der selben Lichtfarbe, mit dem selben Lichtstrom zu beziehen und somit liefern zu können. Das weitere Problem ist der fehlende Modulstandard, der einen Kunden bei einem Leuchtmitteldefekt dazu zwingt, das Modul beim gleichen Hersteller zu kaufen. Lampen wie Halogenmetall-dampflampen, Leuchtstofflampen und Natriumdampflampen konnten hier einfach, herstellerübergreifend getauscht werden.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Wartungsfreundlichkeit:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	7,64	7,45	0,76

Die Systeme werden ähnlich wartungsfreundlich eingeschätzt, Wartung und Wiederbeschaffung werden sehr differenziert betrachtet. War bei der Wiederbeschaffung von Ersatzteilen die Mehrheit der Befragten zufriedener mit den klassischen Systemen, so sieht man bei der Wartung selbst keine großen Unterschiede.

Zuverlässigkeit

Eine konventionelle Straßenleuchte ist im Verhältnis zur LED relativ unempfindlich. Bei einem Defekt oder im Falle einer Überspannung wird einfach das Leuchtmittel oder auch das Netzteil getauscht.

Die Elektronik in vielen LED Leuchten kann im Falle einer Überspannung komplett kaputt gehen und auch nicht mehr einfach vor Ort ausgetauscht werden. Hinzu kommt, dass moderne Leuchten oft mit zusätzlichen Sensoren, Funkmodulen oder ähnlichem ausgestattet sind, welche weitere Fehlerquellen darstellen.

Die Lebensdauer des CPO Leuchtmittels beträgt ca. 18000h, bei einer Ausfallsrate von 5% zu diesem Zeitpunkt. Bei einer kalkulierten Lebensdauer der Beleuchtungsanlage von ca. 20 Jahren entspricht das, bei einer jährlichen Brenndauer von ca. 3200h, ungefähr 4 Leuchtmittelwechseln in dieser Zeit. Die meisten Hersteller versprechen mehr als 50000h an Lebensdauer, einige geben auch 100000h an, leider fehlen oft die Details zur Lebensdauerangabe, d.h. es gibt keine oder mangelhafte Angaben dazu, wie hoch die Ausfallsrate bei Erreichen der Lebensdauer ist und wie hoch der Lichtstromrückgang der Leuchte ist. Zu den langen Lebensdauern gibt es nur Laborversuche, aber allgemein wird eher darauf vertraut, dass die versprochenen Leistungsdaten eingehalten werden.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Zuverlässigkeit:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	7,82	8,73	0,85

Die Zuverlässigkeit von klassischen Systemen wird höher eingeschätzt als jene von LED Systemen, es war aber durchaus ein höherer Abstand zwischen den Systemen zu erwarten, da LED Leuchten gerade am Beginn oft mit Kinderkrankheiten zu kämpfen hatten und als eher anfällig galten. Es scheint aber so zu sein, dass diese Tatsache kaum mehr eine Rolle spielt und gerade bei dieser Bewertung in Zukunft kein Unterschied mehr erkennbar sein wird.

Stand der Technik

Wie bereits bei verschiedenen anderen Kriterien dargestellt, gilt die LED Beleuchtung als aktueller Stand der Technik, ausgestattet mit CLO Netzteilen, Funkmodulen, Sensoren und anderen technischen Feinheiten, erfüllen diese Leuchten beinahe jeden Wunsch des Betreibers. Weiterentwicklungen bei klassischen Leuchten finden so gut wie nicht mehr statt. Die Entladungslampe und andere Leuchtmittel gelten als alt und nicht mehr zeitgemäß.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Stand der Technik:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	9,64	6,18	0,73

Das Ergebnis entspricht den Erwartungen, das eigentlich ebenfalls moderne CPO Leuchtmittel wird nicht mehr mit dem Stand der Technik verbunden.

Stromverbrauch

Wie bei der Gegenüberstellung der Leuchtmittelleistungsdaten bereits erkennbar war, kann sich eine CPO Leuchte, was den Lichtstrom angeht, durchaus mit einer LED Leuchte messen. Das größte Problem ist der subjektive Eindruck, der bei vielen Kunden entstanden ist, dass LEDs gleichzusetzen sind mit geringem Stromverbrauch, Alternativen sind ohne jede Chance.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Stromverbrauch:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	8,00	4,91	0,85

Die Entladungslampe schneidet trotz ihrer eigentlich guten Werte in der Effizienz äußerst schlecht ab, die subjektive Empfindung der Planer und Entscheider spielt hier eine zu große Rolle.

Montagefreundlichkeit

Dieses Bewertungskriterium betrifft beide Typen gleichermaßen und hat kaum etwas mit der Technik des Leuchtmittels zu tun. Dieser Punkt wird gerade von den ausführenden Firmen und Gewerken als sehr wichtig angesehen, weil eine schwer und umständlich zu montierende Leuchte lange Montagezeiten verursacht, die bei größeren Anlagen zu erheblichen Kosten führen kann. Dieser Punkt ist rein herstellerspezifisch und hat nichts mit dem eingesetzten Leuchtmittel zu tun, wurde aber abgefragt um festzustellen, ob Entscheidungsträger hier Unterschiede sehen.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Montagefreundlichkeit:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	8,00	8,18	0,68

Die Montagefreundlichkeit ist nicht abhängig von irgendwelchen lichttechnischen Merkmalen und wurde deshalb erwartungsgemäß beinahe gleich bewertet.

Robustheit

Gerade bei Straßenleuchten ist die Empfindlichkeit gegenüber Einflüssen von außen, ein nicht zu unterschätzender Punkt. Dabei spielt, ähnlich wie beim Punkt Montagefreundlichkeit, das Leuchtmittel eine untergeordnete Rolle, da z.B. bei sehr starken Erschütterungen beide Techniken leicht Schaden nehmen können bzw. die Leuchten zerstört werden können. Wie beim vorhergehenden Punkt wurde diese Frage, obwohl man davon ausgehen kann, dass die Antworten

ähnlich ausfallen sollten, gestellt, um die Einstellung zu den Systemen von den Teilnehmern der Umfrage in Erfahrung bringen zu können.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Robustheit:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	8,18	8,18	0,73

Diese Frage wurde komplett gleich bewertet, es wird kein Unterschied zwischen den Systemen festgestellt, die subjektive Wahrnehmung liegt auch hier bei beiden Systemen, wie bei der Montagefreundlichkeit, auf derselben Ebene.

Wetter- und Klimabeständigkeit

Außenleuchten sind rund um die Uhr den verschiedensten Umwelteinflüssen ausgesetzt. Große Temperaturschwankungen, Luftfeuchtigkeit, Regen und UV-Strahlung setzen den Leuchtenbestandteilen zu und führen zu schnellerer Alterung und können somit zu Fehlern führen. Gehäuseteile, Kabel, Netzteile, Leuchtmittel, usw. sind den verschiedenen Einflüssen ausgesetzt und reagieren komplett unterschiedlich auf diese.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Wetter- und Klimabeständigkeit:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	8,18	7,64	0,73

Entgegen den erwarteten Ergebnissen kann die LED Leuchte hier leichte Vorteile für sich verbuchen.

Sehkomfort

LED Außenleuchten arbeiten Großteils mit Linsensystemen, die Lichtmenge wird über die Bestromung und die Anzahl der Linsen gesteuert. In herkömmlichen Straßenleuchtensystemen kommen meistens Reflektoren zum Einsatz, welche das Licht gezielt verteilen, diese Reflektoren haben den Vorteil, dass man das Leuchtmittel tiefer in der Leuchte positionieren kann und trotzdem eine einigermaßen hohe Effizienz erzielen kann. LED Einzelpunkte sitzen im Gegensatz dazu weiter an der Lichtaustrittsebene, diese können vom Benutzer besser eingesehen werden und können im peripheren Sehfeld durchaus zu Beeinträchtigungen im Sehkomfort führen. Hier machen sich hochwertige Systeme durchaus bezahlt. Zum Sehkomfort zählen auch die lichttechnischen Eigenschaften des Leuchtmittels, wie z.B. CRI und Lichtfarbe.

Ergebnis aus der Befragung zum Punkt Sehkomfort:

<i>Produkt</i>	<i>LED Leuchte</i>	<i>CPO Leuchte</i>	<i>Gewichtung</i>
<i>Wertung</i>	7,27	8,18	0,73

In den Befragungen hat sich ergeben, dass die Meisten das Licht von klassischen Reflektorleuchten hinsichtlich des Sehkomforts besser beurteilen.

4.2.4. Auswertung

Die einzelnen Werte wurden aus der Befragung und der verbalen Beurteilung in Zahlen transformiert. Die Skala geht von 0-10, wobei 0 den schlechtesten und 10 den besten Fall darstellt. Die Ergebnisse der 11 Antworten wurden gemittelt und den einzelnen Kategorien und den beiden Systemen zugewiesen. Am Ende wurde die ungewichtete Nutzensumme gebildet.

	LED System	konventionelles System
Preisniveau	4,36	5,82
Qualität	8,00	7,27
Wiederbeschaffung	5,82	8,55
Wartungsfreundlichkeit	7,64	7,45
Zuverlässigkeit	7,82	8,73
Stand der Technik	9,64	6,18
Stromverbrauch	8,00	4,91
Montagefreundlichkeit	8,00	8,18
Robustheit	8,18	8,18
Klimabeständigkeit	8,18	7,64
Sehkomfort	7,27	8,18
Summenwerte	82,91	81,09

Tabelle 19: Auswertung Expertenbefragung

Mittels Zusatzfrage über die Wichtigkeit der Frage sollte die Gewichtung der Fragen umgesetzt werden. Interessanterweise war diese durch alle Fragen hindurch ähnlich gestaltet und hat das Ergebnis nur unwesentlich beeinflusst.

	Gewichtet		Gewichtung
	LED System	konventionelles System	
Preisniveau	3,21	4,28	0,74
Qualität	6,33	5,75	0,79
Wiederbeschaffung	4,39	6,45	0,75
Wartungsfreundlichkeit	5,83	5,69	0,76
Zuverlässigkeit	6,61	7,38	0,85
Stand der Technik	7,01	4,50	0,73
Stromverbrauch	6,69	4,11	0,84
Montagefreundlichkeit	5,45	5,58	0,68
Robustheit	5,95	5,95	0,73
Klimabeständigkeit	5,95	5,55	0,73
Sehkomfort	5,29	5,95	0,73
Summenwerte	62,72	61,19	

Tabelle 20: Auswertung Expertenbefragung mit Gewichtung

Die Teilnehmer dieser Expertenbefragung waren sich im Vorfeld des Gespräches sehr sicher, dass das LED Leuchtsystem wesentlich besser abschneiden wird, als die konventionelle Leuchte. Ein Feedback war, dass die Umfrage eine gewisse Überraschung hervorgerufen hat, weil bei der Fragestellung parallel zu beiden Systemen der Unterschied, subjektiv empfunden, plötzlich nicht mehr so groß ausfällt, wie im Vorfeld vermutet. Mit den verschiedenen Fragen konfrontiert und auf Einzelaspekte hingewiesen, war der gedachte, uneinholbare Rückstand der konventionellen Systeme plötzlich wesentlich kleiner, auch wenn die LED am Ende doch den minimal besseren Wert erzielen konnte.

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Umrüstung einer Straßenbeleuchtung aus den verschiedensten Blickwinkeln vorgenommen, einer davon war der technische Aspekt der Beleuchtung mit den reinen Leistungsdaten, vor allem hinsichtlich Stromverbrauch und Effizienz. Im Weiteren wurden in einer Marktanalyse verschiedene Leuchten hinsichtlich Effizienz verglichen, mit dem Ergebnis, dass es ein klassischer Leuchtmitteltyp doch mit den modernen LED Leuchten aufnehmen kann, was Lichtstrom und Effizienz angeht. Aus diesem Punkt alleine lässt sich also nicht unbedingt eine Entscheidung für, oder gegen, eines der Systeme ableiten. Im nächsten Schritt wurden zwei Musterstraßen, wie sie sehr häufig im ländlichen Bereich anzutreffen sind, simuliert, bewertet und verglichen. Die beiden Varianten haben gezeigt, dass über die Stromeinsparung, durch ein modernes effizientes System, die hohen Investitionskosten auf die Lebensdauer der Lichtanlage nicht wirklich zu amortisieren sind. Ein Tausch einer Lichtanlage macht also nur Sinn, wenn eine Straße renoviert wird und auch die Leuchten ersetzt werden müssen bzw. wenn Sicherheitsaspekte der Beleuchtung im Vordergrund stehen und deshalb die Anlage getauscht werden muss. Wenn eine neue Beleuchtung gefördert wird, dann kann sich eine Anlage für den Betreiber früher rechnen, allerdings haben sowohl das S-Klassen Beispiel als auch das ME-Klassen Beispiel gezeigt, dass eine Eins-zu-eins Umrüstung auf keinen Fall der richtige Weg ist. Man würde unter Umständen, wie die laufenden Kosten bei der S-Klassenbetrachtung zeigen, sogar höhere Energiekosten tragen müssen, als bei einer normkonformen Auslegung. Ein ungeprüfter Austausch der Leuchten, ohne lichttechnische Planung, ist abzulehnen. Nach der technischen und kostenmäßigen Betrachtung wurde eine Bewertung der subjektiven Eindrücke von Planern und Entscheidern vorgenommen. Diese Eindrücke wurden anhand einer Umfrage und einer anschließenden Nutzwertanalyse erfasst und bewertet. Überraschenderweise erhielt das konventionelle System ähnlich gute Bewertungen in den verschiedenen Kriterien wie ein modernes LED System.

Diese Betrachtungen führen zum Ergebnis, dass das klassische System noch nicht am Ende angelangt wäre und durchaus seine Berechtigung am Markt hätte.

Leider ist das Ende der klassischen Systeme wohl eingeläutet, da so gut wie alle großen Hersteller den Großteil, oder teilweise die Gesamtheit, ihrer Produktpalette auf LED Technik umgestellt haben. Mit der entsprechenden Weiterentwicklung hätte das angesprochene Lichtsystem durchaus das Potential der LED die Stirn bieten zu können.

Anhang

Literaturverzeichnis

Monographien und sonstige Veröffentlichungen

Bartenbach, Christian:

Handbuch für Lichtgestaltung. Lichttechnische und Wahrnehmungspsychologische Grundlagen, Springer, Wien 2009

Bright, Keith; Cook, Geoff:

The colour, light, and contrast manual. Designing and managing inclusive built environments, Wiley-Blackwell, Chichester 2010

Ermschel, Ulrich; Möbius, Christian; Wengert, Holger:

Investition und Finanzierung. 3 Auflage, Springer, Berlin 2013

Gall, Dietrich:

Grundlagen der Lichttechnik. Kompendium. 2. Aufl. München, Pflaum, München [u.a.] 2007

Hoffmeister, Wolfgang:

Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse. Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen. 2., überarb. Aufl., Berliner Wiss.-Verl., Berlin 2008

Kaiser, Robert:

Qualitative Experteninterviews. Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung. Springer VS (Lehrbuch), Wiesbaden 2014

Licht.de:

Die Beleuchtung mit künstlichem Licht, Licht.de, Fördergemeinschaft Gutes Licht (licht.wissen, 01), Frankfurt 2014

Licht.de:

Straßen, Wege und Plätze, Licht.de, Fördergemeinschaft Gutes Licht (licht.wissen, 03), Frankfurt 2014

Stelling, Johannes N.:

Kostenmanagement und Controlling. 3., unveränd. Oldenbourg, Aufl. München [u.a.] 2009

Thiemann, Nikolaus; Aigner, Martin:

Licht im öffentlichen Raum. Der praxisorientierte Leitfaden durch die Aussenbeleuchtung., 2., aktualisierte Aufl., Austrian Standards plus GmbH, Wien 2013

Trilux-Lenze:

Beleuchtungspraxis. Außenbeleuchtung., 1. Auflage, Arnsberg: Trilux. Arnsberg 2009

Tiroler Umweltanwaltschaft:

Die helle Not - Wenn Licht zum Problem wird, 4., völlig überarbeitete Auflage. Tiroler Umweltanwaltschaft, Innsbruck 2012

Internetquellen

AE Schröder :: LED Funktional

<http://www.aeschreder.at/cms/index.php?id=948>, zuletzt geprüft am 24.07.2015.

Koffer² 70 - Philips

<http://www.ecat.lighting.philips.de//technische-strassenleuchten/aufsatzleuchten/koffer2-sgp070/20498/cat/#>, zuletzt geprüft am 09.07.2015.

LED-Beleuchtung - Produkte - SWARCO Futurit

<https://www.swarco.com/futurit/Produkte/LED-Beleuchtung>, zuletzt geprüft am 24.07.2015.

MASTER CosmoWhite CPO-TW & CPO-TW Xtra – Philips

<http://www.ecat.lighting.philips.at/l/professionelle-lampen/entladungslampen/keramische-metallhalogendampflampen/master-cosmowhite-cpo-tw-cpo-tw-xtra/18233/cat/?t1=ProductList>, zuletzt geprüft am 24.07.2015.

MASTER CosmoWhite CPO-TW & CPO-TW Xtra – Philips

<http://www.ecat.lighting.philips.de/l/professionelle-lampen/entladungslampen/keramische-metallhalogendampflampen/master-cosmowhite-cpo-tw-cpo-tw-xtra/19860/cat/?t1=ProductList#t=ProductList&q=cpo>, zuletzt geprüft am 09.07.2015.

MASTERColour CDM-T 150W/830 G12 1CT – Philips

http://www.ecat.lighting.philips.at/l/professionelle-lampen/kompakte-entladungslampen/mastercolour-cdm/mastercolour-cdm-t/928083705125_eu/, zuletzt geprüft am 11.07.2015.

Siteco Beleuchtungstechnik GmbH: Katalog Außenleuchten

http://www.siteco.com/de/at_de/produkte/katalog-aussenleuchten/chapter/1550.html, zuletzt geprüft am 24.07.2015.

Straßen- und Stadtleuchten – Philips

<http://www.ecat.lighting.philips.at/l/aussenleuchten/strassen-und-stadtbeleuchtung/strassen-und-stadtleuchten/72994/cat/>, zuletzt geprüft am 24.07.2015.

Thorn Road Lighting

<http://www.thornlighting.com/en/products/outdoor-lighting/road-lighting>, zuletzt geprüft am 24.07.2015.

Das LED-Funktionsprinzip

<http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/modern-und-effizient-leds/die-lichtquelle-led/das-led-funktionsprinzip/>, zuletzt aktualisiert am 12.08.2015, zuletzt geprüft am 19.09.2015.

Google Formulare: Kostenlos Umfragen erstellen und analysieren

https://www.google.com/intl/de_at/forms/about/, zuletzt aktualisiert am 03.06.2015, zuletzt geprüft am 05.09.2015.

Bega Produkte: Produktgruppen

<http://www.bega.com/de/produkt>, zuletzt geprüft am 24.07.2015.

Normen und Verordnungen:

VERORDNUNG (EU) Nr. 1194/2012, Europäische Union (2012):

EN 13201-2, 01.02.2004, Straßenbeleuchtung Teil 2: Güteermkmale.

Anlagen

Lichtberechnung Diplomarbeit

Beispiel Berechnung ME und S Klassen Vergleich

Datum: 15.10.2015
Bearbeiter(in): Markus Kindl

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux

15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

Inhaltsverzeichnis

Lichtberechnung Diplomarbeit	
Projektdeckblatt	1
Inhaltsverzeichnis	2
corlight led_LS34_Satiné-3MC2_0514_M	
Leuchtendatenblatt	3
corlight led_LS33_G-3MC2_0614_M	
Leuchtendatenblatt	4
Siteco 5NA522E1MR28+5NA52000XS PILZLEUCHTE	
Leuchtendatenblatt	5
Bestand S6	
Planungsdaten	6
Lichttechnische Ergebnisse	7
3D Rendering	8
Falschfarben Rendering	9
1:1 Umrüstung S6	
Planungsdaten	10
Lichttechnische Ergebnisse	11
3D Rendering	12
Falschfarben Rendering	13
normgerecht S6	
Planungsdaten	14
Lichttechnische Ergebnisse	15
3D Rendering	16
Falschfarben Rendering	17
Bestand ME6	
Planungsdaten	18
Lichttechnische Ergebnisse	19
3D Rendering	21
Falschfarben Rendering	22
1:1 Umrüstung ME6	
Planungsdaten	23
Lichttechnische Ergebnisse	24
3D Rendering	26
Falschfarben Rendering	27
normgerecht ME6	
Planungsdaten	28
Lichttechnische Ergebnisse	29
3D Rendering	31
Falschfarben Rendering	32

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux

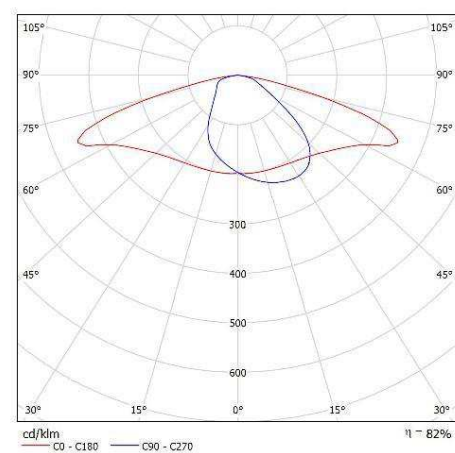
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

corlight led_LS34_Satiné-3MC2_0514_M / Leuchtendatenblatt

Ein Leuchtenbild entnehmen Sie bitte unserem
Leuchtenkatalog.

Lichtaustritt 1:



Leuchtenklassifikation nach DIN: A30
CIE Flux Code: 37 70 95 100 83

Aufgrund fehlender Symmetrieeigenschaften kann zu
dieser Leuchte keine UGR-Tabelle dargestellt
werden.

Lichtberechnung Diplomarbeit



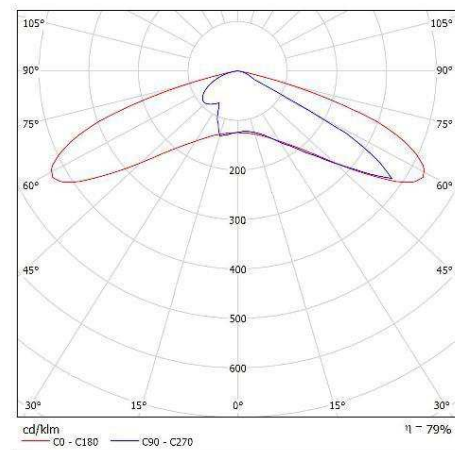
DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

corlight led_LS33_G-3MC2_0614_M / Leuchtendatenblatt

Lichtaustritt 1:

Ein Leuchtenbild entnehmen Sie bitte unserem
Leuchtenkatalog.



Leuchtenklassifikation nach DIN: A20
CIE Flux Code: 29 72 97 100 79

Aufgrund fehlender Symmetrieeigenschaften kann zu
dieser Leuchte keine UGR-Tabelle dargestellt
werden.

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux

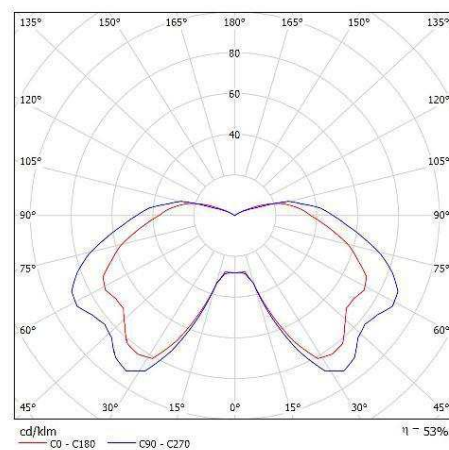
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

Siteco 5NA522E1MR28+5NA52000XS PILZLEUCHTE / Leuchtendatenblatt

Ein Leuchtenbild entnehmen Sie bitte unserem
Leuchtenkatalog.

Lichtaustritt 1:



Leuchtenklassifikation nach DIN: B21
CIE Flux Code: 25 53 81 85 53

Lichtaustritt 1:

Blendungsbewertung nach UGR											
Decke		70	70	50	50	30	70	70	50	50	30
Wände		50	30	50	30	30	50	30	50	30	30
Boden		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Raumgröße X Y		Blickrichtung quer zur Leuchtenachse					Blickrichtung längs zur Leuchtenachse				
2H	2H	60.2	61.6	60.7	62.1	62.7	61.0	62.5	61.6	63.0	63.5
	3H	63.0	64.3	63.6	64.9	65.5	64.1	65.4	64.7	65.9	66.6
	4H	64.5	65.7	65.0	66.3	66.9	65.6	66.9	66.2	67.4	68.0
	6H	65.9	67.1	66.5	67.8	68.3	67.2	68.3	67.7	68.9	69.5
	8H	66.7	67.8	67.3	68.4	69.0	68.0	69.1	68.6	69.7	70.3
4H	12H	67.5	68.6	68.1	69.2	69.8	68.9	69.0	69.4	70.5	71.2
	2H	61.5	62.7	62.1	63.3	63.9	62.1	63.3	62.7	63.9	64.5
	3H	64.4	65.5	65.0	66.1	66.6	65.3	66.4	65.9	67.0	67.6
	4H	66.0	67.0	66.6	67.6	68.3	67.0	67.9	67.6	68.5	69.2
	6H	67.6	68.5	68.2	69.1	69.8	68.7	69.5	69.3	70.2	70.9
6H	8H	68.4	69.2	69.1	69.9	70.6	69.6	70.4	70.2	71.0	71.8
	12H	69.4	70.1	70.0	70.8	71.5	70.6	71.3	71.2	72.0	72.7
	4H	66.8	67.6	67.4	68.3	69.0	67.6	68.4	68.2	69.0	69.8
	6H	68.7	69.4	69.3	70.0	70.8	69.5	70.2	70.2	70.9	71.7
	8H	69.7	70.3	70.4	71.0	71.8	70.6	71.3	71.3	71.9	72.7
12H	12H	70.8	71.4	71.5	72.1	72.9	71.9	72.4	72.6	73.1	73.9
	4H	67.0	67.7	67.7	68.4	69.2	67.7	68.4	68.3	69.1	69.9
	6H	69.0	69.6	69.7	70.3	71.1	69.8	70.4	70.5	71.1	71.9
	8H	70.1	70.7	70.8	71.4	72.2	71.0	71.5	71.7	72.2	73.1
Variation der Beobachterposition für Leuchtenabstände:											
S = 1.0H		+0.1 / -0.1					+0.1 / -0.1				
S = 1.5H		+0.3 / -0.3					+0.3 / -0.3				
S = 2.0H		+0.4 / -0.5					+0.4 / -0.4				
Standardtabelle		BK12					BK12				
Korrektursumme		52.3					53.2				
Korrigierte Blendniveaus bezogen auf 650lm/m² Gesamtleuchtdichte											

Lichtberechnung Diplomarbeit


DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

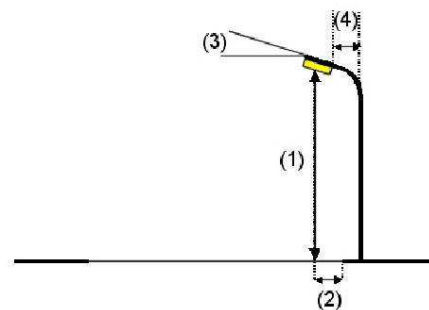
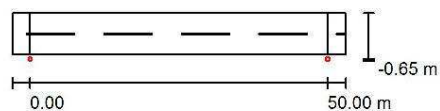
Bestand S6 / Planungsdaten

Straßenprofil

Fahrbahn 1 (Breite: 7.000 m, Anzahl Fahrstreifen: 2, Belag: R3, q0: 0.070)

Wartungsfaktor: 0.67

Leuchtenanordnungen



Leuchte:	Siteco 5NA522E1MR28+5NA52000XS PILZLEUCHTE
Lichtstrom (Leuchte):	3339 lm
Lichtstrom (Lampen):	6300 lm
Leuchtenleistung:	83.0 W
Anordnung:	einseitig unten
Mastabstand:	50.000 m
Montagehöhe (1):	4.000 m
Lichtpunkthöhe:	3.707 m
Lichtpunktüberhang (2):	-0.650 m
Auslegerneigung (3):	0.0 °
Auslegerlänge (4):	0.000 m

 Höchstwerte der Lichtstärke
 bei 70°: 82 cd/klm
 bei 80°: 65 cd/klm
 bei 90°: 48 cd/klm

Jeweils in alle Richtungen, die bei gebrauchsfähig installierter Leuchte den angegebenen Winkel mit der unteren Vertikalen bilden.

 Anordnung erfüllt die Lichtstärkeklasse G1.
 Anordnung erfüllt die Blendindexklasse D.6.

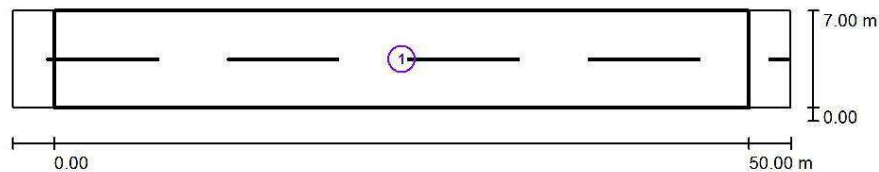
Lichtberechnung Diplomarbeit


DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

Bestand S6 / Lichttechnische Ergebnisse



Wartungsfaktor: 0.67

Maßstab 1:401

Bewertungsfeldliste

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 50.000 m, Breite: 7.000 m
 Raster: 17 x 5 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse: S6

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

 Ist-Werte laut Berechnung:
 Soll-Werte laut Klasse:
 Erfüllt/Nicht erfüllt:

E_m [lx]	E_{min} [lx]
1.82	0.09
≥ 2.00	≥ 0.60
X	X

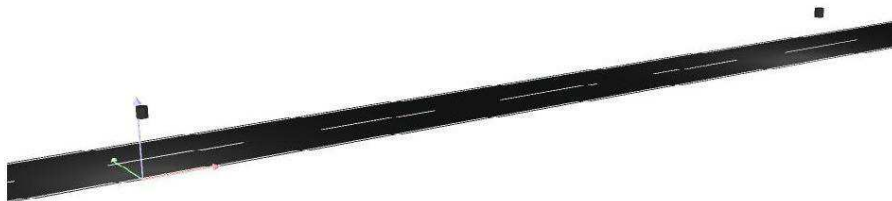
Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

Bestand S6 / 3D Rendering



Lichtberechnung Diplomarbeit

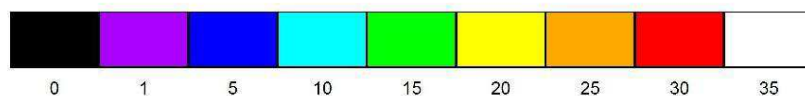


DIALux

15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

Bestand S6 / Falschfarben Rendering



lx

Lichtberechnung Diplomarbeit


DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

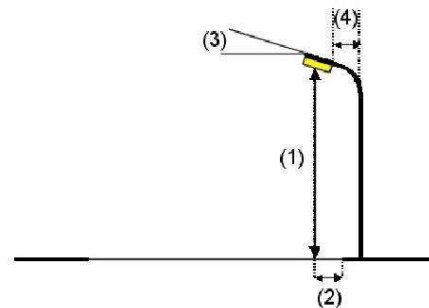
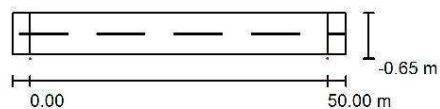
1:1 Umrüstung S6 / Planungsdaten

Straßenprofil

Fahrbahn 1 (Breite: 7.000 m, Anzahl Fahrstreifen: 2, Belag: R3, q0: 0.070)

Wartungsfaktor: 0.80

Leuchtenanordnungen



Leuchte:	corlight led_LS33_G-3MC2_0614_M	Höchstwerte der Lichtstärke
Lichtstrom (Leuchte):	4458 lm	bei 70°: 341 cd/klm
Lichtstrom (Lampen):	5631 lm	bei 80°: 19 cd/klm
Leuchtenleistung:	49.5 W	bei 90°: 0.00 cd/klm
Anordnung:	einseitig unten	Jeweils in alle Richtungen, die bei gebrauchsfähig installierter Leuchte den angegebenen Winkel mit der unteren Vertikalen bilden.
Mastabstand:	50.000 m	Keine Lichtstärke oberhalb von 90°.
Montagehöhe (1):	4.000 m	Anordnung erfüllt die Lichtstärkeklasse G6.
Lichtpunkthöhe:	3.950 m	Anordnung erfüllt die Blendindexklasse D.6.
Lichtpunktüberhang (2):	-0.650 m	
Auslegerneigung (3):	0.0 °	
Auslegerlänge (4):	0.000 m	

Lichtberechnung Diplomarbeit

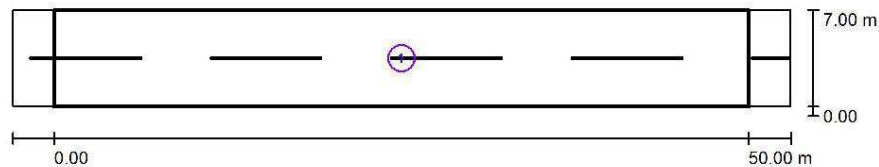


DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

1:1 Umrüstung S6 / Lichttechnische Ergebnisse



Wartungsfaktor: 0.80

Maßstab 1:401

Bewertungsfeldliste

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 50.000 m, Breite: 7.000 m
 Raster: 17 x 5 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse: S6

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	E_m [lx]	E_{min} [lx]
Ist-Werte laut Berechnung:	5.73	0.02
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 2.00	≥ 0.60
Erfüllt/Nicht erfüllt:	X ¹	X

¹ Achtung: Um eine gewisse Gleichmäßigkeit sicherzustellen, darf der tatsächliche Wert der mittleren Beleuchtungsstärke das 1.5-fache des für die Klasse vorgesehenen Mindestwertes nicht überschreiten.

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

1:1 Umrüstung S6 / 3D Rendering



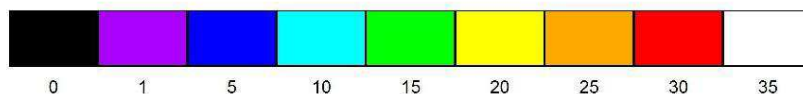
Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

1:1 Umrüstung S6 / Falschfarben Rendering



lx

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

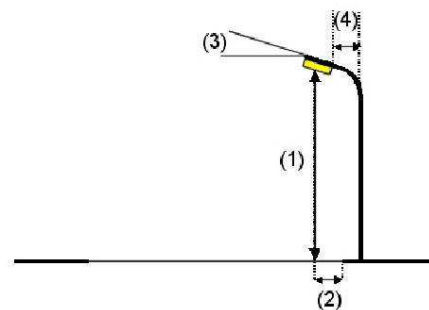
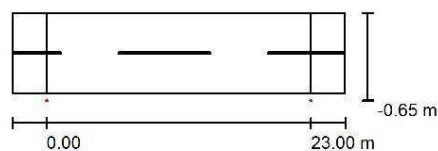
normgerecht S6 / Planungsdaten

Straßenprofil

Fahrbahn 1 (Breite: 7.000 m, Anzahl Fahrstreifen: 2, Belag: R3, q0: 0.070)

Wartungsfaktor: 0.80

Leuchtenanordnungen



Leuchte:	corlight led_LS33_G-3MC2_0614_M	Höchstwerte der Lichtstärke
Lichtstrom (Leuchte):	987 lm	bei 70°: 341 cd/klm
Lichtstrom (Lampen):	1247 lm	bei 80°: 19 cd/klm
Leuchtenleistung:	9.9 W	bei 90°: 0.00 cd/klm
Anordnung:	einseitig unten	Jeweils in alle Richtungen, die bei gebrauchsfähig installierter Leuchte den angegebenen Winkel mit der unteren Vertikalen bilden.
Mastabstand:	23.000 m	Keine Lichtstärke oberhalb von 90°.
Montagehöhe (1):	5.000 m	Anordnung erfüllt die Lichtstärkeklasse G6.
Lichtpunkthöhe:	4.950 m	Anordnung erfüllt die Blendindexklasse D.6.
Lichtpunktüberhang (2):	-0.650 m	
Auslegerneigung (3):	0.0 °	
Auslegerlänge (4):	0.000 m	

Lichtberechnung Diplomarbeit

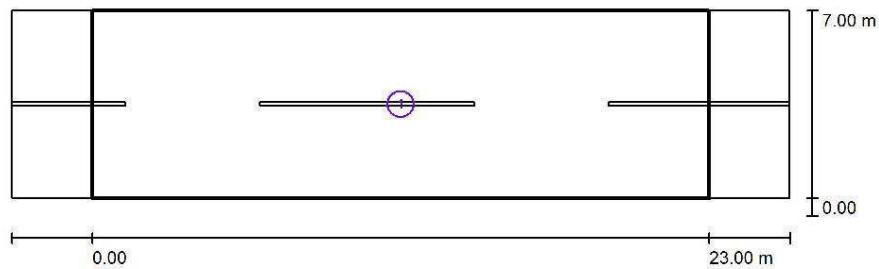


DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

normgerecht S6 / Lichttechnische Ergebnisse



Wartungsfaktor: 0.80

Maßstab 1:208

Bewertungsfeldliste

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 23.000 m, Breite: 7.000 m
 Raster: 10 x 5 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse: S6

(Alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

 Ist-Werte laut Berechnung:
 Soll-Werte laut Klasse:
 Erfüllt/Nicht erfüllt:

E_m [lx]	E_{min} [lx]
2.65	0.73
≥ 2.00	≥ 0.60
✓	✓

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

normgerecht S6 / 3D Rendering



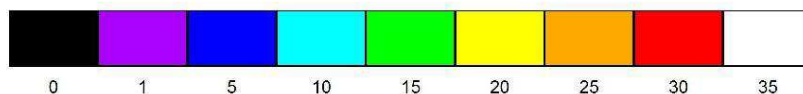
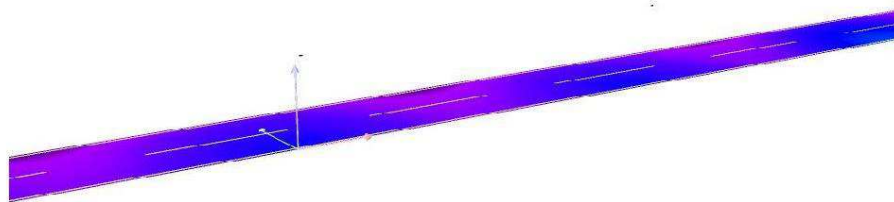
Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

normgerecht S6 / Falschfarben Rendering



lx

Lichtberechnung Diplomarbeit


DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

Bestand ME6 / Planungsdaten

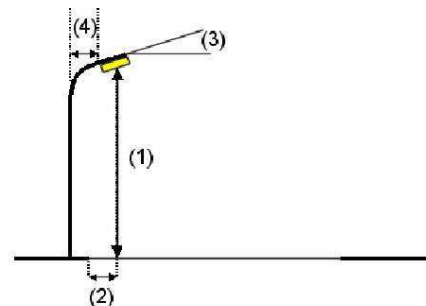
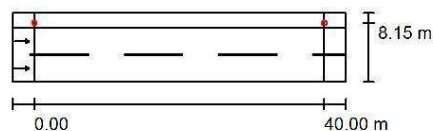
Straßenprofil

Gehweg 1 (Breite: 2.000 m)

Fahrbahn 1 (Breite: 7.500 m, Anzahl Fahrstreifen: 2, Belag: R3, q0: 0.070)

Wartungsfaktor: 0.67

Leuchtenanordnungen



Leuchte:	Siteco 5NA522E1MR28+5NA52000XS PILZLEUCHTE
Lichtstrom (Leuchte):	3339 lm
Lichtstrom (Lampen):	6300 lm
Leuchtenleistung:	83.0 W
Anordnung:	einseitig oben
Mastabstand:	40.000 m
Montagehöhe (1):	4.000 m
Lichtpunkthöhe:	3.707 m
Lichtpunktüberhang (2):	-0.650 m
Auslegerneigung (3):	0.0 °
Auslegerlänge (4):	0.000 m

Höchstwerte der Lichtstärke

bei 70°:	82 cd/klm
bei 80°:	65 cd/klm
bei 90°:	48 cd/klm

Jeweils in alle Richtungen, die bei gebrauchsfähig installierter Leuchte den angegebenen Winkel mit der unteren Vertikalen bilden.

Anordnung erfüllt die Lichtstärkeklasse G1.

Anordnung erfüllt die Blendindexklasse D.6.

Lichtberechnung Diplomarbeit

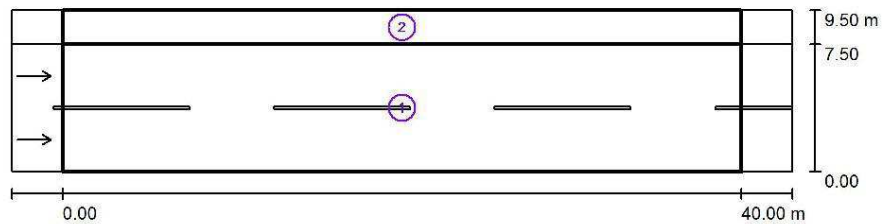


DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

Bestand ME6 / Lichttechnische Ergebnisse



Wartungsfaktor: 0.67

Maßstab 1:329

Bewertungsfeldliste

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 40.000 m, Breite: 7.500 m
 Raster: 14 x 6 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Belag: R3, q0: 0.070
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse: ME6

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	L_m [cd/m²]	U0	UI	TI [%]	SR
Ist-Werte laut Berechnung:	0.12	0.11	0.10	69	0.93
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 0.30	≥ 0.35	≥ 0.40	≤ 15	/
Erfüllt/Nicht erfüllt:	✗	✗	✗	✗	✓

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

Bestand ME6 / Lichttechnische Ergebnisse

Bewertungsfeldliste

- 2 Bewertungsfeld Gehweg 1
Länge: 40.000 m, Breite: 2.000 m
Raster: 14 x 3 Punkte
Zugehörige Straßenelemente: Gehweg 1.
Ausgewählte Beleuchtungsklasse: CE5

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	E_m [lx]	U0
Ist-Werte laut Berechnung:	3.52	0.06
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 7.50	≥ 0.40
Erfüllt/Nicht erfüllt:	X	X

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

Bestand ME6 / 3D Rendering



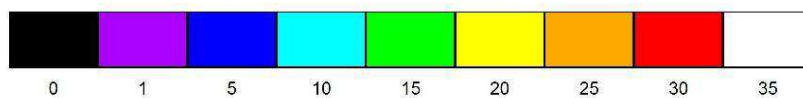
Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

Bestand ME6 / Falschfarben Rendering



lx

Lichtberechnung Diplomarbeit


DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

1:1 Umrüstung ME6 / Planungsdaten

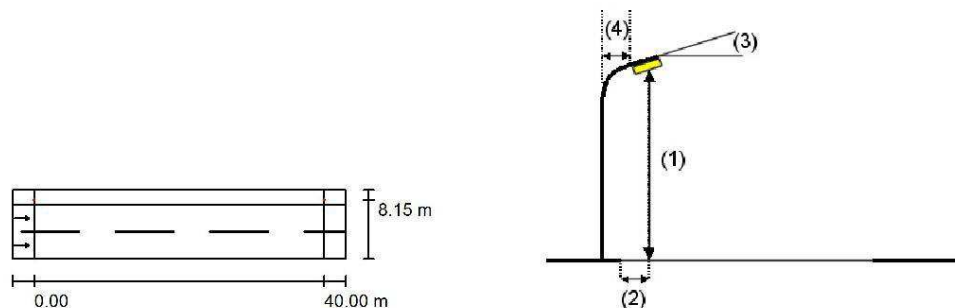
Straßenprofil

Gehweg 1 (Breite: 2.000 m)

Fahrbahn 1 (Breite: 7.500 m, Anzahl Fahrstreifen: 2, Belag: R3, q0: 0.070)

Wartungsfaktor: 0.67

Leuchtenanordnungen



Leuchte:	corlight led_LS34_Satiné-3MC2_0514_M
Lichtstrom (Leuchte):	4644 lm
Lichtstrom (Lampen):	5631 lm
Leuchtenleistung:	49.5 W
Anordnung:	einseitig oben
Mastabstand:	40.000 m
Montagehöhe (1):	4.000 m
Lichtpunkthöhe:	3.950 m
Lichtpunktüberhang (2):	-0.650 m
Auslegerneigung (3):	0.0 °
Auslegerlänge (4):	0.000 m

Höchstwerte der Lichtstärke

bei 70°:	425 cd/klm
bei 80°:	86 cd/klm
bei 90°:	0.00 cd/klm

Jeweils in alle Richtungen, die bei gebrauchsfähig installierter Leuchte den angegebenen Winkel mit der unteren Vertikalen bilden.

Keine Lichtstärke oberhalb von 90°.

Anordnung erfüllt die Lichtstärkeklasse G4.

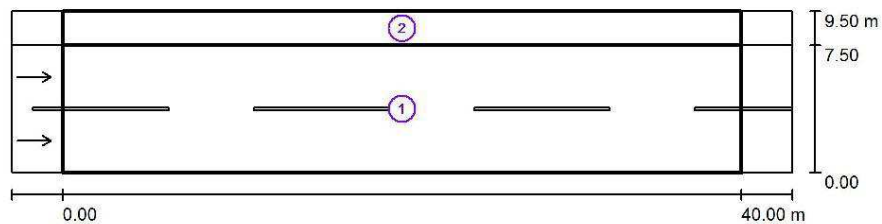
Anordnung erfüllt die Blendindexklasse D.6.

Lichtberechnung Diplomarbeit


DIALux
15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

1:1 Umrüstung ME6 / Lichttechnische Ergebnisse



Wartungsfaktor: 0.67

Maßstab 1:329

Bewertungsfeldliste

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
 Länge: 40.000 m, Breite: 7.500 m
 Raster: 14 x 6 Punkte
 Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
 Belag: R3, q0: 0.070
 Ausgewählte Beleuchtungsklasse: ME6

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	L_m [cd/m²]	U0	UI	TI [%]	SR
Ist-Werte laut Berechnung:	0.33	0.06	0.07	42	0.71
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 0.30	≥ 0.35	≥ 0.40	≤ 15	/
Erfüllt/Nicht erfüllt:	✓	✗	✗	✗	✓

Lichtberechnung Diplomarbeit

**DIALux**
15.10.2015Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail**1:1 Umrüstung ME6 / Lichttechnische Ergebnisse****Bewertungsfeldliste**

- 2 Bewertungsfeld Gehweg 1
Länge: 40.000 m, Breite: 2.000 m
Raster: 14 x 3 Punkte
Zugehörige Straßenelemente: Gehweg 1.
Ausgewählte Beleuchtungsklasse: CE5

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	E_m [lx]	U0
Ist-Werte laut Berechnung:	9.49	0.03
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 7.50	≥ 0.40
Erfüllt/Nicht erfüllt:	✓	✗

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux

15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

1:1 Umrüstung ME6 / 3D Rendering



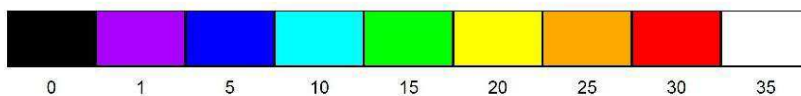
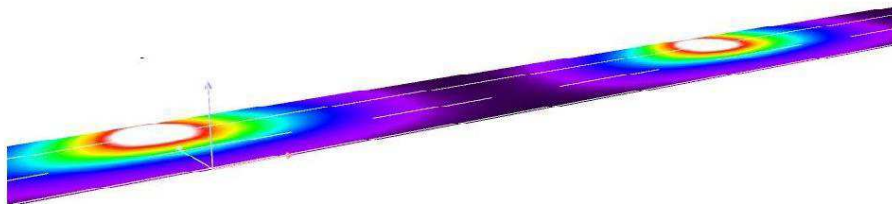
Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

1:1 Umrüstung ME6 / Falschfarben Rendering



lx

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux

15.10.2015

 Bearbeiter(in) Markus Kindl
 Telefon
 Fax
 e-Mail

normgerecht ME6 / Planungsdaten

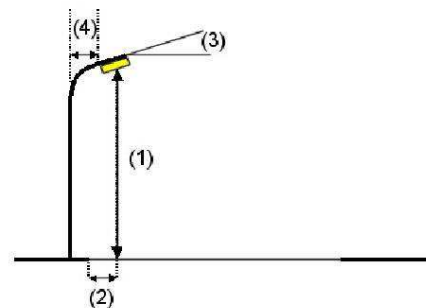
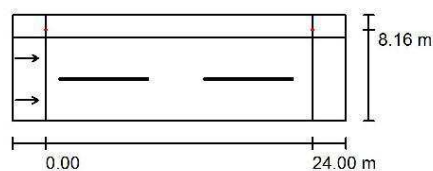
Straßenprofil

Gehweg 1 (Breite: 2.000 m)

Fahrbahn 1 (Breite: 7.500 m, Anzahl Fahrstreifen: 2, Belag: R3, q0: 0.080)

Wartungsfaktor: 0.67

Leuchtenanordnungen



Leuchte:	corlight led_LS34_Satiné-3MC2_0514_M	Höchstwerte der Lichtstärke
Lichtstrom (Leuchte):	3096 lm	bei 70°: 433 cd/klm
Lichtstrom (Lampen):	3754 lm	bei 80°: 136 cd/klm
Leuchtenleistung:	33.0 W	bei 90°: 12 cd/klm
Anordnung:	einseitig oben	Jeweils in alle Richtungen, die bei gebrauchsfähig installierter Leuchte den angegebenen Winkel mit der unteren Vertikalen bilden..
Mastabstand:	24.000 m	Anordnung erfüllt die Lichtstärkeklasse G2.
Montagehöhe (1):	6.000 m	Anordnung erfüllt die Blendindexklasse D.4.
Lichtpunkthöhe:	5.950 m	
Lichtpunktüberhang (2):	-0.650 m	
Auslegerneigung (3):	7.0 °	
Auslegerlänge (4):	0.000 m	

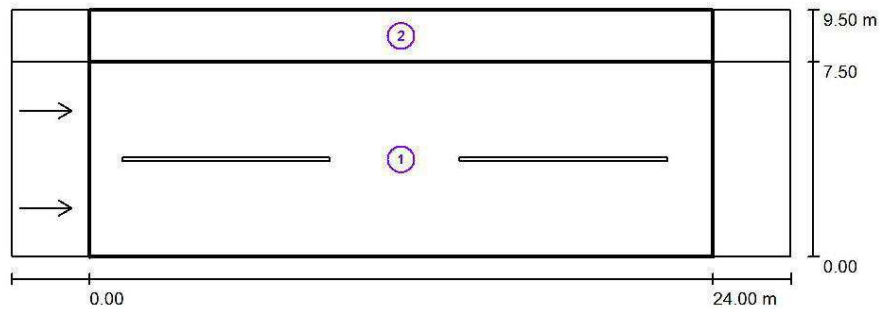
Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

normgerecht ME6 / Lichttechnische Ergebnisse



Wartungsfaktor: 0.67

Maßstab 1:215

Bewertungsfeldliste

- 1 Bewertungsfeld Fahrbahn 1
Länge: 24.000 m, Breite: 7.500 m
Raster: 10 x 6 Punkte
Zugehörige Straßenelemente: Fahrbahn 1.
Belag: R3, q0: 0.070
Ausgewählte Beleuchtungsklasse: ME6

(Alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	L_m [cd/m²]	U0	U1	TI [%]	SR
Ist-Werte laut Berechnung:	0.42	0.36	0.83	15	0.61
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 0.30	≥ 0.35	≥ 0.40	≤ 15	/
Erfüllt/Nicht erfüllt:	✓	✓	✓	✓	✓

Lichtberechnung Diplomarbeit

**DIALux**
15.10.2015Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail**normgerecht ME6 / Lichttechnische Ergebnisse****Bewertungsfeldliste**

- 2 Bewertungsfeld Gehweg 1
Länge: 24.000 m, Breite: 2.000 m
Raster: 10 x 3 Punkte
Zugehörige Straßenelemente: Gehweg 1.
Ausgewählte Beleuchtungsklasse: CE5

(Nicht alle photometrischen Anforderungen sind erfüllt.)

	E_m [lx]	U0
Ist-Werte laut Berechnung:	6.64	0.47
Soll-Werte laut Klasse:	≥ 7.50	≥ 0.40
Erfüllt/Nicht erfüllt:		

Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

normgerecht ME6 / 3D Rendering



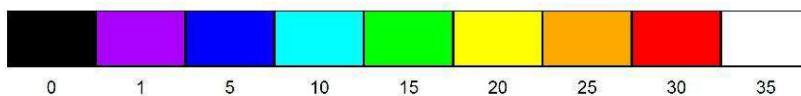
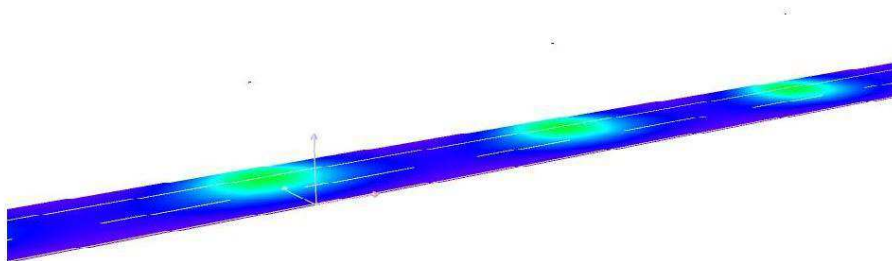
Lichtberechnung Diplomarbeit



DIALux
15.10.2015

Bearbeiter(in) Markus Kindl
Telefon
Fax
e-Mail

normgerecht ME6 / Falschfarben Rendering



lx

Auswertung Befragung

Timestamp	Wie empfinden Sie das Preisniveau von Straßenleucht?	Wie empfinden Sie das Preisniveau von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie empfinden Sie die Qualität von Straßenleucht en v.a. hinsichtlich Oberflächen, Materialien, Elektronik?	Wie empfinden Sie die Qualität von Straßenleucht en v.a. hinsichtlich Oberflächen, Materialien, Elektronik?	Wie bewerten Sie die Wartungsfreudigkeit von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie bewerten Sie die Wartungsfreudigkeit von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie bewerten Sie die Zuverlässigkeit von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie bewerten Sie die Zuverlässigkeit von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]
8.11.2015 15:03:51	mittel	mittel	7 mittel	hoch	8 schlecht	gut	8 mittel	gut	8 gut	gut	8 gut	gut	8
8.11.2015 18:40:38	hoch	mittel	4 mittel	hoch	7 sehr schlecht	sehr gut	8 gut	mittel	5 mittel	gut	5 mittel	gut	7
8.11.2015 19:48:19	hoch	mittel	7 hoch	mittel	9 schlecht	sehr gut	7 sehr gut	mittel	7 gut	sehr gut	7 gut	sehr gut	7
8.12.2015 14:59:08	sehr hoch	hoch	9 hoch	hoch	7 schlecht	mittel	6 mittel	gut	7 mittel	sehr gut	7 mittel	sehr gut	9
8.13.2015 9:44:56	hoch	mittel	8 hoch	mittel	10 - sehr wic gut	gut	10 - sehr wic mittel	gut	9 gut	gut	9 gut	gut	10 - sehr wic
8.18.2015 9:29:22	mittel	niedrig	8 sehr hoch	hoch	7 gut	sehr gut	5 sehr gut	mittel	9 sehr gut	sehr gut	9 sehr gut	sehr gut	9
8.18.2015 14:03:44	hoch	sehr hoch	8 hoch	mittel	7 gut	gut	9 gut	gut	8 gut	mittel	8 gut	mittel	9
8.18.2015 15:50:19	hoch	mittel	7 hoch	hoch	8 schlecht	gut	8 gut	sehr gut	6 mittel	sehr gut	6 mittel	sehr gut	7
8.18.2015 18:05:53	hoch	mittel	7 hoch	hoch	7 mittel	gut	7 mittel	gut	7 gut	gut	7 gut	gut	8
8.19.2015 16:04:51	hoch	mittel	8 hoch	mittel	10 - sehr wic gut	gut	10 - sehr wic mittel	gut	9 gut	gut	9 gut	gut	10 - sehr wic
8.20.2015 10:35:47	mittel	niedrig	8 sehr hoch	hoch	7 gut	sehr gut	5 sehr gut	mittel	9 sehr gut	sehr gut	9 sehr gut	sehr gut	9

Die Leuchte repräsentiert den Stand der Technik? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie empfinden Sie das Preisniveau von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie empfinden Sie das Preisniveau von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie empfinden Sie die Qualität von Straßenleucht en v.a. hinsichtlich Oberflächen, Materialien, Elektronik?	Wie empfinden Sie die Qualität von Straßenleucht en v.a. hinsichtlich Oberflächen, Materialien, Elektronik?	Wie bewerten Sie die Wartungsfreudigkeit von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie bewerten Sie die Wartungsfreudigkeit von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie bewerten Sie die Zuverlässigkeit von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie bewerten Sie die Zuverlässigkeit von Straßenleucht en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]	Wie wichtig ist en? [LED Beleuchtung]
gut	mittel	7 mittel	hoch	9 gut	gut	8 gut	gut	8 gut	mittel	8 mittel	gut	8 mittel	gut	8 Stadtwerke/k Stadwerke E
sehr gut	schlecht	8 sehr niedrig	mittel	9 mittel	mittel	5 mittel	mittel	5 mittel	mittel	5 mittel	gut	5 mittel	gut	6 Stadwerke/Kommune
sehr gut	mittel	6 sehr niedrig	mittel	8 mittel	gut	7 gut	sehr gut	8 gut	sehr gut	7 mittel	gut	7 mittel	gut	7 Hersteller
gut	gut	8 niedrig	hoch	9 gut	gut	9 gut	gut	3 gut	gut	8 mittel	gut	8 mittel	gut	8 Stadwerke/k SWD
sehr gut	mittel	8 niedrig	hoch	9 gut	gut	10 - sehr wic gut	gut	10 - sehr wic gut	gut	10 - sehr wic gut	mittel	10 - sehr wic gut	mittel	10 - sehr wic Stadwerke/KNGD
sehr gut	gut	9 sehr gut	niedrig	9 sehr gut	sehr gut	4 sehr gut	sehr gut	8 sehr gut	gut	8 gut	sehr gut	8 gut	sehr gut	9 Planer
sehr gut	schlecht	9 niedrig	sehr hoch	9 gut	gut	7 gut	gut	8 gut	gut	7 sehr gut	gut	7 sehr gut	gut	6 Planer
sehr gut	schlecht	5 hoch	hoch	5 hoch	sehr gut	3 gut	mittel	5 mittel	mittel	6 mittel	sehr gut	6 mittel	sehr gut	8 Planer
sehr gut	gut	7 mittel	hoch	8 gut	gut	8 gut	mittel	7 sehr gut	gut	8 gut	gut	8 gut	gut	8 sonstige
sehr gut	mittel	8 niedrig	hoch	9 gut	gut	10 - sehr wic gut	gut	10 - sehr wic gut	gut	10 - sehr wic gut	mittel	10 - sehr wic gut	mittel	10 - sehr wic Stadwerke/KNGD
sehr gut	gut	8 sehr niedrig	niedrig	9 sehr gut	sehr gut	4 sehr gut	sehr gut	8 sehr gut	gut	8 gut	sehr gut	8 gut	sehr gut	9 Planer

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Prof.Dr.Dr.h.c. Hartmut Lindner, für das Engagement und seine Unterstützung herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Andrea, die mich während des Studiums unterstützt und mich motiviert hat, und meinen Eltern, die mir dieses Studium überhaupt ermöglicht haben.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift